

Санкт-Петербургский государственный университет

***КУЗНЕЦОВА Мария Руслановна***

**Выпускная квалификационная работа**

***Оценка изменений уровня режима крупных озер мира в условиях  
изменения климата***

Уровень образования:

Направление *05.03.04 «Гидрометеорология»*

Основная образовательная программа *СВ.5021.2015 «Гидрометеорология»*

Профиль «Гидрология»

Научный руководитель:

Профессор кафедры гидрологии суши,  
д.г.н., профессор Вуглинский В.С.

Рецензент:

Зав. лабораторией ФГБУ «Государственный  
гидрологический институт»,  
д.г.н., профессор Бабкин В.И.

Санкт-Петербург

2019

## Содержание

Введение .....	3
1. Уровень озера и его колебания .....	5
2. Объекты, исходные данные, методика исследования.....	8
3. Особенности структуры водного баланса рассматриваемых озер .....	16
4. Особенности многолетней динамики уровней воды озер .....	25
4.1 Результаты анализа многолетней динамики уровней воды озер с использованием хронологических графиков .....	25
4.2 Результаты анализа многолетней динамики уровней воды озер с использованием разностных интегральных кривых .....	33
5. Особенности внутригодового хода уровней озер.....	42
6. Оценка многолетних изменений уровней воды озер .....	60
6.1 Оценка однородности многолетних рядов уровня воды .....	60
6.2 Оценка значимости трендов в многолетних рядах уровня воды .....	62
6.3 Оценка количественных изменений уровней воды озер за период нестационарной климатической ситуации.....	69
Заключение.....	73
Список литературы.....	76

## Введение

Крупные озера планеты имеют важное географическое и народнохозяйственное значение. Они содержат в себе большие запасы пресной воды, являются источниками питания крупных рек, определяют микроклимат окружающей территории, являются местом обитания разнообразной флоры и фауны, активно используются человеком в целях судоходства, водоснабжения, рыбоводства и рекреации; на их берегах расположены многочисленные населенные пункты.

Морфометрические характеристики крупных озер и характер обводненности прилегающих территорий тесно связаны с режимом их уровня, интенсивное повышение которого или, наоборот, падение могут приводить к серьезным экологическим последствиям и нарушению сложившейся хозяйственной деятельности. Именно поэтому изучение характера многолетних колебаний уровней воды крупных озер является актуальной современной задачей. Как известно, положение уровня воды отражает сложившееся соотношение между компонентами водного баланса озера, Основными из них являются поверхностный приток, осадки, испарение и поверхностный сток из озера. Каждый из перечисленных компонентов в той или иной мере зависит от климатических условий в бассейне озера.

Согласно мнению ученых климат, начиная со второй половины 20 века, начал меняться, и многие природные процессы и явления в этих условиях стали отличаться от тех, которые были характерны для условий стационарного климата. Эта ситуация коснулась и динамики уровней воды крупных озер, поскольку, как было указано выше, уровень воды является результатом сложившегося соотношения между компонентами водного баланса озера, многие из которых прямо или косвенно зависят от климатических условий, сложившихся на водосборе.

Основной целью настоящей работы является оценка изменений уровня режима крупных озер мира в условиях нестационарной климатической ситуации последних десятилетий. В качестве объектов исследования были выбраны 8 крупных озер Северного полушария – Байкал, Балхаш, Иссык-Куль, Ладожское, Онежское, Верхнее, Онтарио, Эри.

В процессе выполнения работы был проведен анализ многолетней и внутригодовой динамики уровней этих озер в увязке с анализом изменений двух метеорологических элементов – осадков и температуры воздуха. Была, также, рассмотрена типовая структура воднобалансовых соотношений, характерных для

рассматриваемых озер. Вышеуказанное позволило объяснить выявленные закономерности в многолетней динамике уровней озер и их изменениях в последние десятилетия при нестационарной климатической ситуации.

При выполнении настоящей работы были решены следующие основные задачи:

1. Выбраны объекты исследования, выполнены анализ и обобщение исходных данных;
2. Выполнен анализ типовой структуры водного баланса и соотношений основных его компонентов для рассмотренных озер;
3. Выявлены закономерности многолетней динамики уровней воды в увязке с сопутствующими метеорологическими элементами;
4. Выявлены закономерности внутригодового режима уровней воды в увязке с сопутствующими метеорологическими элементами;
5. Выполнен анализ однородности многолетних рядов уровней воды за период 1960-2016 гг. и оценена значимость трендов в рядах уровней воды за разные периоды
6. Получены количественные оценки изменений уровней воды озер за период нестационарной климатической ситуации (1980-2016 гг.).

## 1. Уровень озера и его колебания

Уровень воды – важное гидрологическое понятие, присущее всем типам водных объектов за исключением ледников и используемое в инженерных расчетах, при планировании территорий, прогнозировании природных явлений и т.д.

Согласно Чеботареву А.И. - это «высота поверхности воды, отсчитываемая от некоторой постоянной плоскости сравнения» (Чеботарев, 1978).

Уровень водоема определяет положение его береговой линии и площади затопления, морфометрические характеристики (площадь зеркала озера, длина, ширина, глубина, длина береговой линии), судоходность, и др. Уровень является и своеобразным индикатором запаса воды в водоеме. Снижение уровня может привести к нехватке воды для промышленного и хозяйственного водоснабжения, сделать водоем непригодным для судоходства и лесосплава, будет способствовать более раннему ледоставу. Эти последствия особенно актуальны для засушливых регионов.

Колебания уровня могут быть вызваны тремя причинами (Михайлов, Добровольский, 1991):

- 1) Изменением объема воды – эвстатические (гидрократические) колебания;
- 2) Неравномерным воздействием на водную поверхность внешних факторов (изменение давления, ветер и др.) при неизменном объеме – денивеляционные колебания;
- 3) Изменением абсолютной высоты водоема в результате подвижек Земной коры – геократические колебания.

Многолетние изменения уровня, которые рассматриваются в данной работе, обусловлены первой причиной. Поэтому далее колебания уровня воды будем рассматривать как следствия изменения объема озер, который определяется как результирующий компонент сложившегося соотношения между элементами водного баланса водоема.

Это соотношение зависит как от климатических характеристик, имеющих циклический характер изменений, так и от хозяйственной деятельности человека усиливающейся год от года. Последняя проявляется в виде воздействия на водосборы (сведение лесов, преобразование рельефа и др.) и непосредственно на гидрографическую сеть (регулирование стока за счет создания водохранилищ, забор воды и др.).

Установлено, что колебания уровня воды характерны не только для современной эпохи, но и для исторического прошлого. Некоторые исследователи (в том числе Шнитников А.В.) связывают их с изменениями увлажнения материков, то есть с изменением количества осадков, летних температур и величины испарения. Выявлены колебания уровня воды разных масштабов: многовековые, вековые и внутривековые. Они могут совпадать по времени и накладываться, усиливая или ослабляя друг друга. Многовековой ритм обусловлен сменой климатических эпох: короткой прохладной и влажной эпохи - 300-500 лет, медленной теплой и сухой эпохи – около 1000 лет; каждая из них состоит из двух чередующихся фаз – прохладной влажной и теплой сухой<sup>1</sup>. Современный период относят к теплой сухой эпохе, поэтому, согласно гипотезе, должны наблюдаться потепление, высыхание, уменьшение водности и падение уровня воды в водоемах.

Продолжительность вековых колебаний составляет от 60 до 90 лет<sup>1</sup>. Среди внутривековых колебаний выделяют колебания длительностью 20-35 и 45-50 лет<sup>1,2</sup>, а также более короткие - по 7-11 лет. На рис. 1 представлен хронологический график многолетних колебаний уровня озера Эри, пост Кливленд, за 157 лет – с 1860 по 2016 гг. Цифрами отмечены номера циклов колебаний уровня.

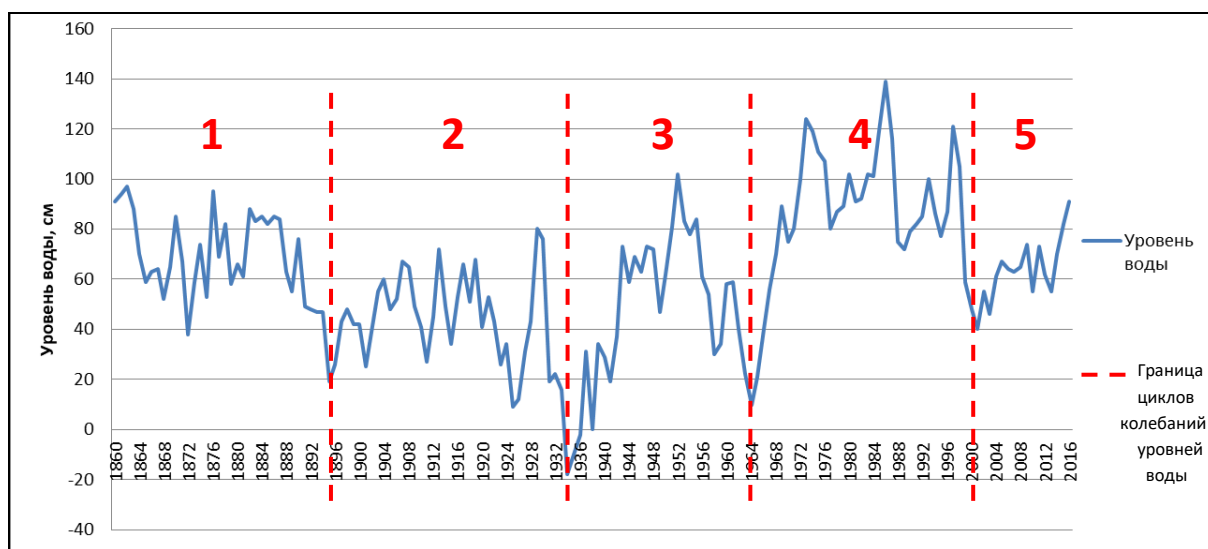


Рис. 1. Многолетний ход уровня воды оз. Эри (пост Кливленд)

На графике хорошо прослеживаются внутривековые циклы длительностью от 30 до 46 лет. Внутри каждого из них можно выделить более короткие циклы, примерно по 7 лет. Также можно предположить, что периоды 1 и 2 относятся ко второй фазе

<sup>1</sup> <http://biodat.ru/doc/lib/klimat.htm>

<sup>2</sup> Богословский Б.Б. Озёроведение. Изд-во МГУ, 1960

одной эпохи, а 3, 4, 5 – к первой фазе другой эпохи. Если это предположение верно, то границей между эпохами можно считать 1934 год. К сожалению, длины ряда (157 лет) недостаточно, чтобы более уверенно определить такую границу.

Изучение уровня режима озер в сочетании с динамикой климатических характеристик необходимо для понимания глобальных природных процессов и закономерностей, которое, в свою очередь, необходимо как для практического применения (например, прогноза отметок уровней, расчета площадей затопления и др.), так и для дальнейших фундаментальных научных исследований.

## 2. Объекты, исходные данные, методика исследования

В данной работе в качестве объектов исследования рассматриваются 8 озер: Байкал, Балхаш, Верхнее, Иссык-Куль, Ладожское, Онежское, Онтарио, Эри. Такой выбор обусловлен наличием длительных рядов наблюдений за уровнем воды этих озер в базе данных HYDROLARE. Данные водоемы расположены на территории Евразии и Северной Америки (рис. 2).

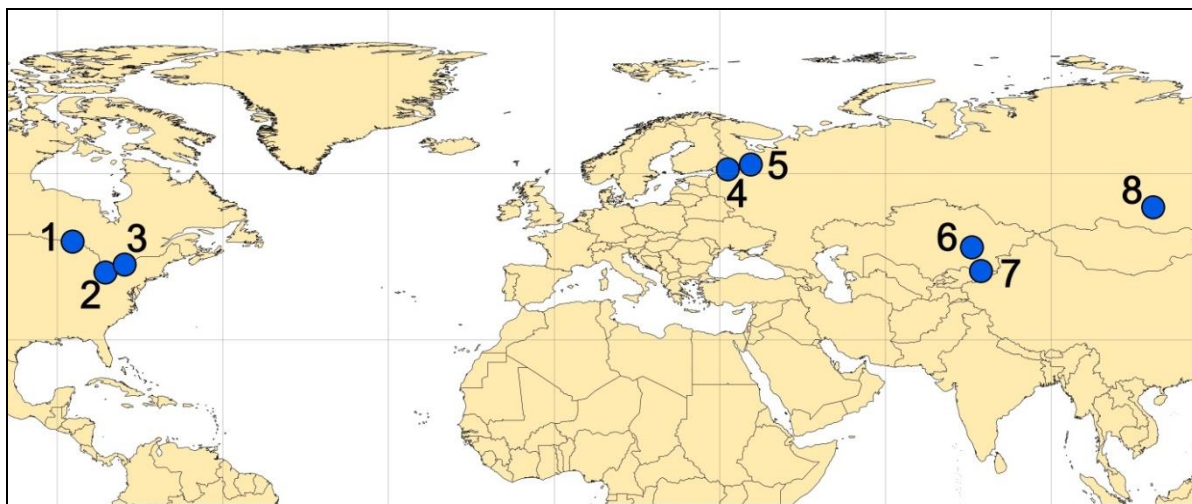


Рис. 2. Объекты исследования: 1 – Верхнее, 2 – Эри, 3 – Онтарио, 4 – Ладожское, 5 – Онежское, 6 – Балхаш, 7 – Иссык-Куль, 8 – Байкал

По принадлежности к тому или иному региону их можно сгруппировать следующим образом:

1. Восточная Сибирь (оз. Байкал);
2. Восточная часть Северной Америки (Верхнее, Онтарио, Эри);
3. Северо-Запад России (Ладога, Онега);
4. Центральная Азия (Балхаш, Иссык-Куль).

Каждое из озер обладает уникальными морфометрическими характеристиками, что в сочетании с физико-географическими условиями обуславливает структуру водного баланса, динамику водных масс и особенности уровня режима (табл. 1).



## Основные географические и морфометрические характеристики озер

№ п/п	Название озера	Местоположение			Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Морфометрические характеристики				
		Широта, град. СШ	Долгота, град. ВД / ЗД	Страна		Объем, м <sup>3</sup>	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Максимальная глубина, м	Длина, м	Ширина, м
1	Байкал	53,22	107,75	РФ	571000	23026,5	31500	1620	636	81
2	Балхаш	46,54	74,88	Казахстан	413000	106	18200	26,5	614	70
3	Верхнее	47,77	-87,37	США, Канада	127700	12100	82100	406	563	257
4	Иссык-Куль	42,43	77,18	Киргизия	22080	1738	6236	668	178	60
5	Ладожское	60,75	31,5	РФ	276000	911	17700	230	219	130
6	Онежское	61,72	35,48	РФ	62800	292	9690	120	248	96
7	Онтарио	43,69	-77,96	США, Канада	64030	1640	18960	244	311	85
8	Эри	42,16	-81,27	США) Канада	78000	484	25700	64	388	92

Исходные данные представляют собой многолетние ряды среднемесячных и среднегодовых значений уровней воды, температуры воздуха, количества осадков и величин испарения, а также координаты уровенных постов и метеостанций.

Ряды уровней воды предоставлены Международным центром данных по гидрологии озер и водохранилищ (International Data Centre on Hydrology of Lakes and Reservoirs – HYDROLARE, функционирующим в Государственном гидрологическом институте под эгидой Всемирной Метеорологической организации (ВМО). Отбор исходных данных производился в несколько этапов. Из базы данных центра, включающей ряды наблюдений на 526 озерах и 695 постах в 19 странах мира, были отобраны данные только по крупным и крупнейшим озерам мира, объемом более 100 км<sup>3</sup>. Первоначальный объем выбранных данных включал многолетние ряды среднемесячных и среднегодовых значений уровней воды на 168 постах 49 озер,

осредненных по водоему уровней воды 17 озер, а также некоторые морфометрические характеристики водоемов, координаты озер и постов и сведения о государственной принадлежности водоемов. После первичного анализа полученных данных были выявлены существенные пропуски в многолетних рядах и далее рассматривались лишь те водоемы, ряды по которым:

- 1) включали в себя данные об уровнях воды на отдельных постах и по водоему в целом;
- 2) имели продолжительность не менее 50-60 лет;
- 3) заканчивались не ранее 2008 г.

Для выбора наиболее репрезентативных рядов были построены хронологические графики хода среднегодовых уровней воды, графики хода уровня воды за период 1980 – 2008 гг., принятый за условный период нестационарной климатической ситуации (см. принятые методические подходы ниже). В результате анализа графиков были еще раз проверены наличие данных, длительность рядов и наличие пропусков, и из 17 озер для дальнейшего анализа были оставлены 8.

Были также построены графики хода уровней по среднегодовым значениям для озерных постов выбранных водоемов. Из-за больших пропусков в данных из 40 постов были оставлены только 25.

В итоге, из первоначально рассмотренных 66 озер со 138 постами, для дальнейшего анализа были оставлены 8 озер с 25 постами (табл. 2, рис. 16).

Пропуски в данных за некоторые годы по постам Валаам, Сторожно (Ладожское оз.), Кондопога, Медвежьегорск, Петрозаводск, Лонгасы, пгт. Вознесенье (Онежское оз.), были заполнены данными из гидрологических ежегодников. В 2019 г. было принято решение продлить ряды данных до 2016 года, чтобы более полно учесть закономерности изменения уровня воды озер с учетом последних лет. Значения уровней на озерах Верхнее, Онтарио, Эри за 2009-2016 гг. были взяты из базы данных центра.

Ряды озер Ладожское, Онежское и Байкал были дополнены с помощью информационной системы АИС ГМВО<sup>3</sup> до 2015 года. Данные за 2016 год для первых двух озер взяты из ЕДС (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши).

---

<sup>3</sup> <https://gmvo.skniivh.ru/>

Ряды наблюдений за уровнем воды для оз. Иссык-Куль и его постов г. Чолпон-Ата и с. Тамга были предоставлены Агентством по гидрометеорологии при Министерстве чрезвычайных ситуаций Кыргызской Республики «КыргызГидромет».

Ряды наблюдений за уровнем воды для оз. Балхаш и его постов ж.д.ст. Мынарал и о. Алгазы были предоставлены Республиканским государственным предприятием на праве хозяйственного ведения при Министерстве энергетики Республики Казахстан «КазГидромет».

Метеорологические данные по температуре воздуха и количеству осадков были получены через Национальный центр экологической информации Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA (National Center for Environmental Information National Oceanic and Atmospheric Administration)<sup>4</sup>. По аналогии с наблюдениями за уровнем воды, было необходимо выбрать непрерывные ряды наблюдений за температурой воздуха и количеством осадков за период 1960-2016 гг. Жестких требований к расположению самих метеостанций не предъявлялось, однако они должны были быть расположены в пределах водосбора озера, но на некотором удалении от самого водного объекта. Всего в работе использованы данные по 8 метеостанциям (табл. 2). Для ряда метеостанций наблюдения оказались ограниченными 2014, 2012 и даже 2008 годами.

Таблица 2

Виды данных, использованные в работе

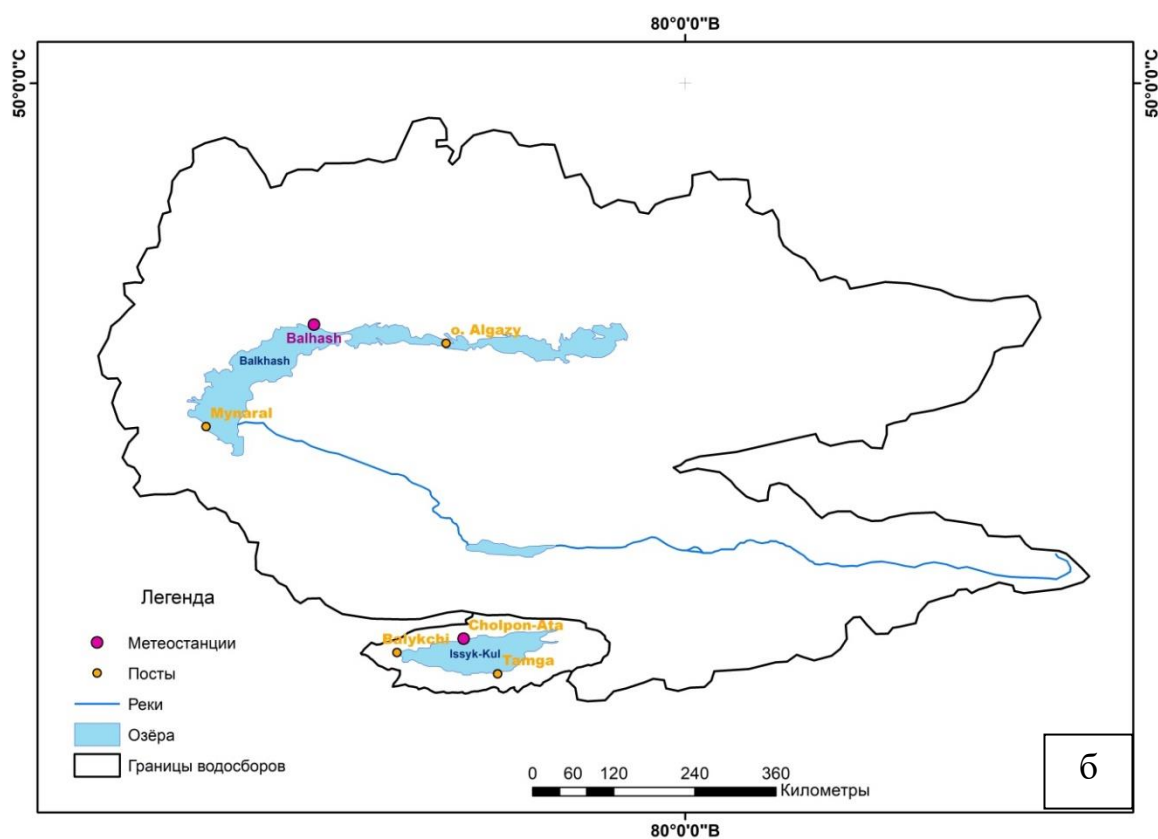
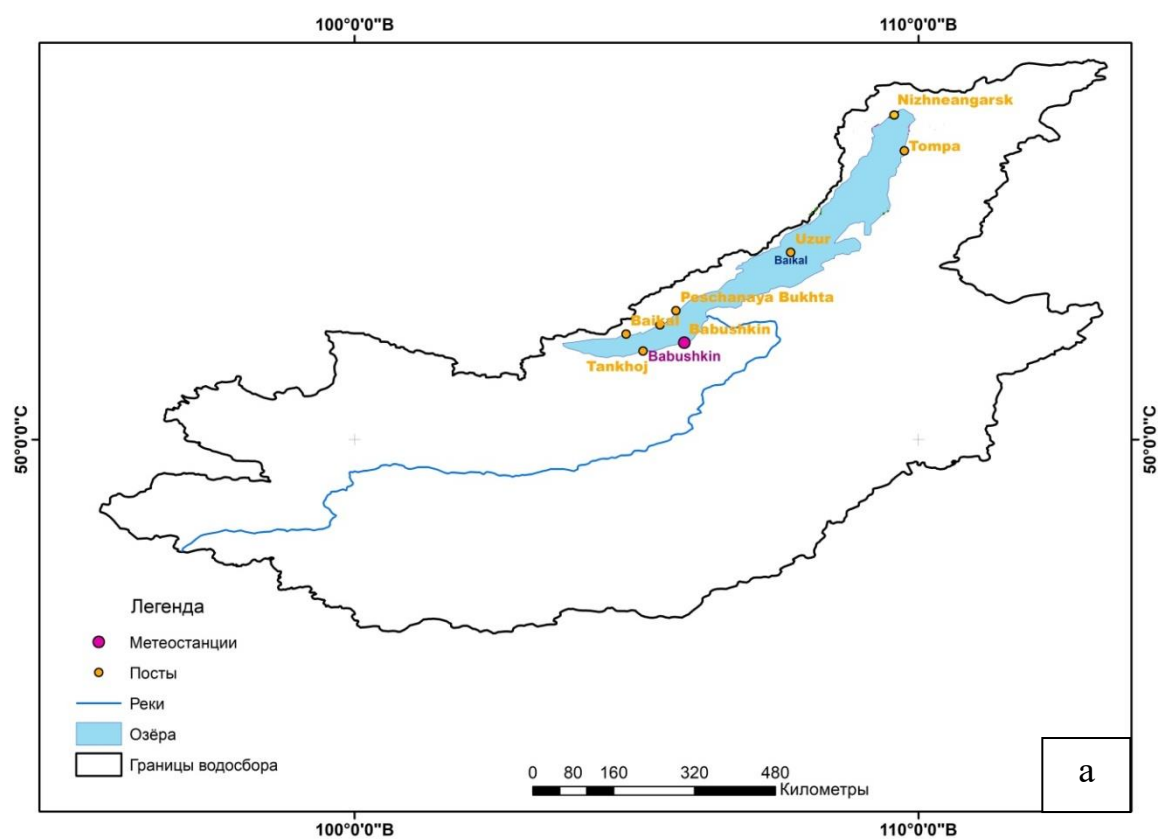
Озеро	Пост	Данные по уровню за период	Метеостанция	Вид данных	Период
1	2	3	4	5	6
Байкал	г. Бабушкин	1960 – 2015	Бабушкин	Температура воздуха	1960 – 2013
	гм. ст. Томпа	1960 – 2015			
	гм. ст. Узур	1960 – 2015			
	пгт Танхой	1960 – 2015		Количество осадков	1960 – 2016
	Песчаная Бухта	1960 – 2015			

<sup>4</sup> <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/findstation>

(Окончание таблицы 2)

1	2	3	4	5	6
<b>Байкал</b>	р.п. Байкал	1960 – 2015	Бабушкин		
	р.п. Нижнеангарск	1960 – 2015			
<b>Балхаш</b>	ж. д. ст. Мынарал	1962 - 2016	Балхаш	Температура воздуха	1960 - 2016
	о. Алгазы	1960 - 2014		Количество осадков	1960 - 2016
<b>Иссык-Куль</b>	г. Чолпон-Ата	1960 - 2016	Чолпон-Ата	Температура воздуха	1960 - 2008
	г. Балыкчи	1960 - 2016		Количество осадков	1960 - 2008
	с. Тамга	1960 - 2016			
<b>Ладожское</b>	о. Валаам	1960 - 2016	Сортавала	Температура воздуха	1960 - 2013
	д. Сторожно	1960 - 2016		Количество осадков	1960 - 2016
<b>Онежское</b>	г. Петрозаводск	1960 - 2016	Петрозаводск	Температура воздуха	1960 - 2013
	г. Кондопога	1960 - 2016			
	г. Медвежьегорск	1960 - 2016		Количество осадков	1960 - 2016
	д. Лонгасы	1960 - 2016			
	пгт Вознесенье	1960 - 2016			
<b>Верхнее</b>	Дулут	1960 - 2016	Тауэр-2С	Температура воздуха	1960 - 2016
	Пойнт Ирокез	1960 - 2016		Количество осадков	1960 - 2016
<b>Онтарио</b>	Рочестер	1960 - 2015	Элледжани Стэйт Парк	Температура воздуха	1960 - 2016
	Кейп Винсент	1960 - 2016		Количество осадков	1960 - 2016
<b>Эри</b>	Тоledo	1960 - 2016	Экрон Кентон Эйрпорт	Температура воздуха	1960 - 2016
	Кливленд	1960 - 2016		Количество осадков	1960 – 2016

Все метеостанции, уровенные посты и границы водосборов озёр нанесены на карты-схемы в программе ArcGIS 10.4. (рис. 3 а – г).



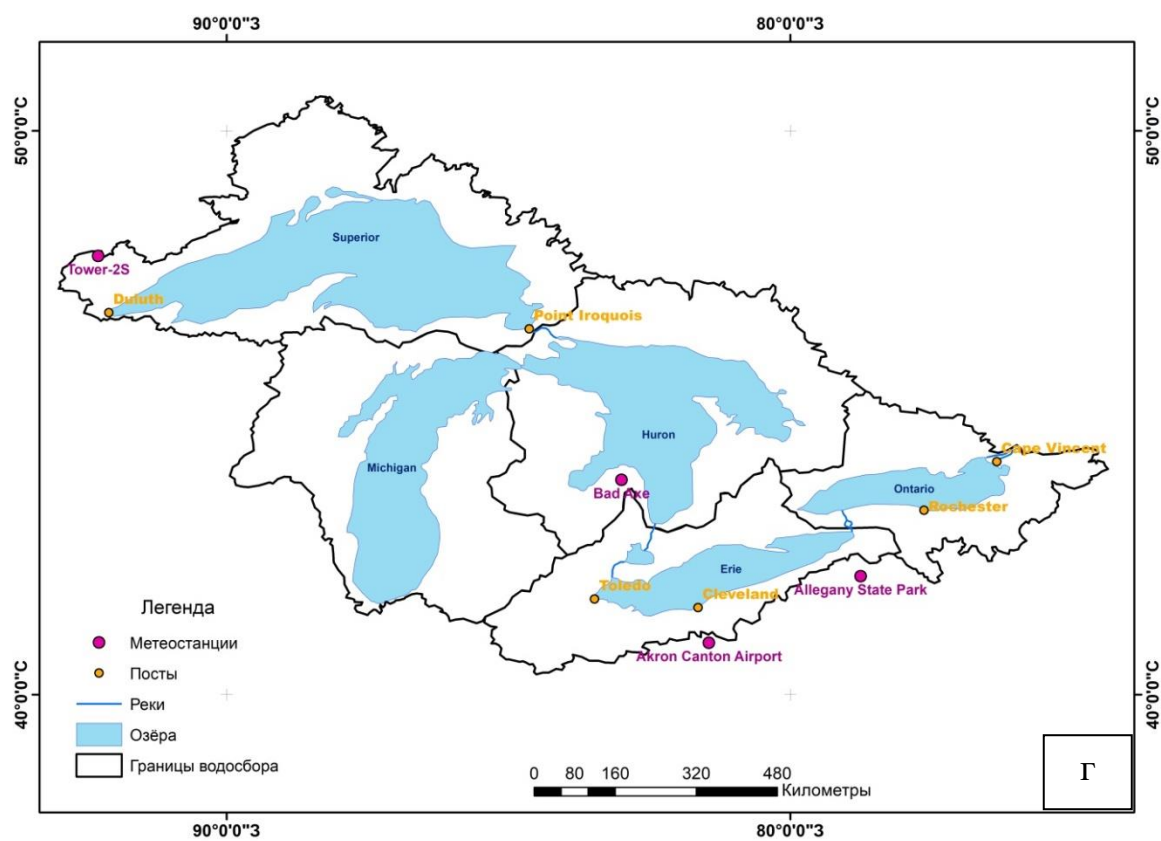
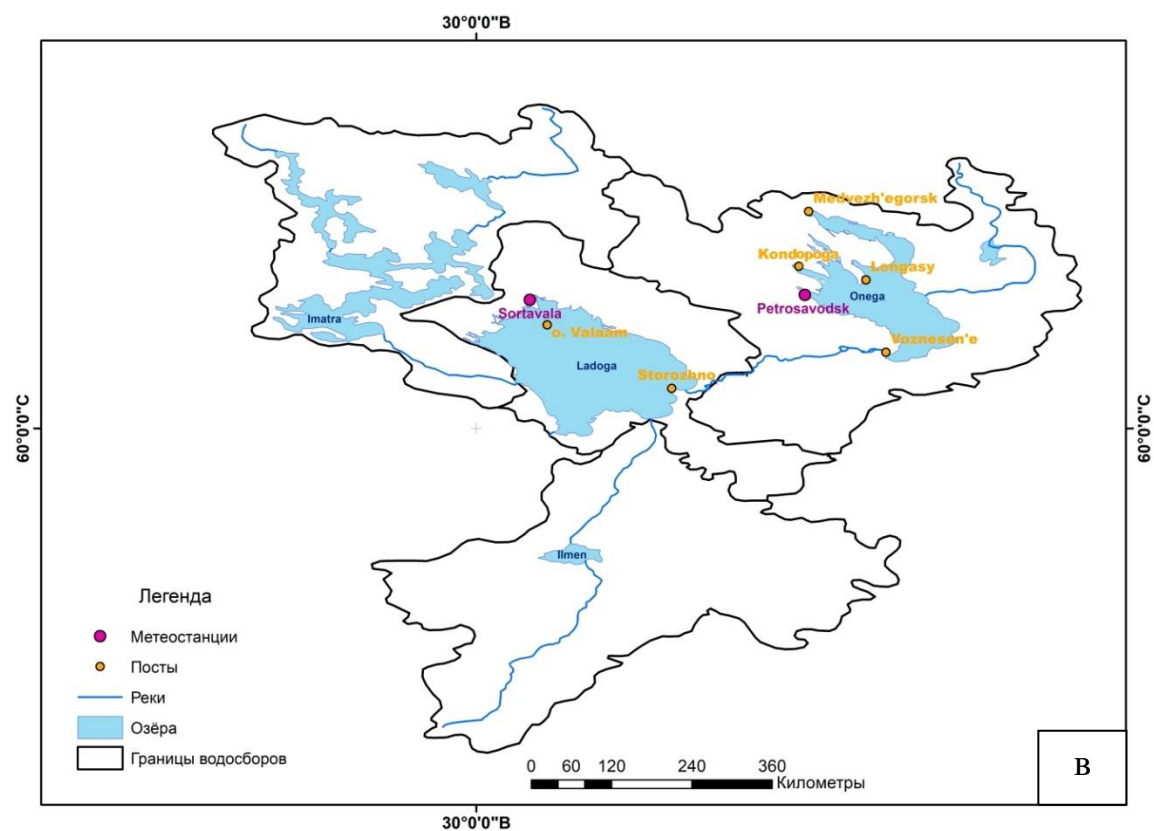


Рис. 3. Картограммы озёр с местоположением постов и метеостанций: а – Байкал (масштаб 1:8.000.000); б – Балхаш, Иссык-Куль (масштаб 1:6.000.000); в – Ладожское, Онежское (масштаб 1:6.000.000); г – Верхнее, Эри, Онтарио (масштаб 1:8.000.000)

Одной из важнейших задач при выполнении работы явился выбор начала периода с не стационарными климатическими условиями последних десятилетий, связанных с потеплением климата, поскольку климатические изменения могли повлиять на естественную динамику уровня воды.

Принято считать, что потепление климата началось еще в начале 20 века. Также известно, что наиболее активно оно стало проявляться на границе 80<sup>х</sup> годов, когда средняя глобальная температура воздуха Северного полушария превысила норму и с тех пор продолжает повышаться (Оценочный доклад..., 2008).

Исходя из этих соображений, за начало периода значимых климатических изменений в данной работе был принят 1980<sup>й</sup> год. В связи с этим, многолетние ряды данных наблюдений были разбиты на два периода - с 1960 г. по 1979 г. (период стационарной климатической ситуации) и с 1980 по 2016 гг. (период нестационарной климатической ситуации).

Методика исследований включала в себя следующие этапы:

- анализ типовой структуры водного баланса и соотношений основных его компонентов для рассматриваемых в данной работе озер;
- анализ многолетней динамики уровней воды и определяющих метеорологических факторов с использованием хронологических графиков;
- анализ цикличности колебаний уровней воды, температуры воздуха и количества осадков путем анализа разностных интегральных кривых соответствующих компонентов;
- выявление особенностей внутригодовой динамики уровней воды в периоды стационарной и нестационарной климатической ситуации;
- анализ однородности многолетних рядов наблюдений за уровнем воды;
- анализ значимости трендовой оставляющей в многолетних рядах уровней воды;
- количественная оценка изменений уровней воды озер за период нестационарной климатической ситуации.

### 3. Особенности структуры водного баланса рассматриваемых озер

Уровенный режим озера формируется под влиянием большого числа разнообразных факторов, которые в конечном итоге формируют структуру водного баланса и определяют динамику колебаний уровня воды [1].

Каждое из рассматриваемых в данной работе озер обладает уникальным сочетанием собственных морфометрических характеристик и физико-географических условий на водосборе (рельеф, климат, растительность, геологическое строение и др.), что обуславливает различие структур их водного баланса.

Среднемноголетние годовые значения основных приходных и расходных компонентов водного баланса рассматриваемых озер за разные периоды приведены в таблице 3.1. В качестве основных компонентов водного баланса рассматриваются в приходной части осадки и приток (поверхностный и подземный), в расходной части - испарение и сток (поверхностный и подземный).

Таблица 3

Среднемноголетние значения основных компонентов водного баланса рассматриваемых озер (Водные ресурсы России..., 2008; Водные ресурсы СССР..., 1987; Мировой водный баланс..., 1974; Brian, Nicolas, 2005; Попова и др., 2010)

Озеро	Период	Приходная часть		Расходная часть		Динамика водного баланса
		Приток, км <sup>3</sup> /год	Осадки на акваторию, км <sup>3</sup> /год	Сток из озера, км <sup>3</sup> /год	Испарение с акватории, км <sup>3</sup> /год	
1	2	3	4	5	6	7
Байкал	1901-1958	59,2	9,4	59,4	9,3	0,07
	1959-1962	68,5	10,6	56,6	11,9	10,6
	1963-1980	59,2	12,3	59,4	14,0	-1,8
	1981-2005	67,1	12,4	63,4	14,9	1,3
Балхаш	1937-1969	15,0	3,6	0,0	18,0	0,6
	1970-1983	12,9	3,5	0,0	18,2	-1,8
	2000-2009	15,2	3,7	0,0	18,0	0,9



(Окончание таблицы 3)

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<b>Иссык-Куль</b>	1935-1980	3,6	1,7	0,0	5,3	0
	1979	3,0	1,6	0,0	4,4	0,2
	1990	2,3	1,3	0,0	4,6	-1,0
<b>Ладожское</b>	1932-1980	69,7	9,3	72,7	6,7	-0,4
	1981-2005	73,6	11,7	77,7	7,3	0,3
<b>Онежское</b>	1932-1951	14,5	5,2	16,3	3,1	0,2
	1952-1980	16,5	5,3	18,4	3,4	-0,05
	1981-2005	16,6	6,2	18,9	3,6	0,3
<b>Верхнее</b>	1959-1966	47,6	62,3	69,7	38,5	1,7
	2001-2003	50,0	65,0	71,0	48,0	-4,0
<b>Онтарио</b>	1959-1966	210,0	16,0	210,0	14,0	2,0
	2001-2003	218,0	16,0	220,0	13,0	1,0
<b>Эри</b>	1959-1966	190,0	22,0	182,0	24,0	6,0
	2001-2003	187,0	23,0	184,0	23,0	3,0

По приведенным данным видно, что объемы воды, вовлеченные в водный баланс различных озер, существенно различаются между собой и характеризуют средние значения ежегодного водообмена за рассматриваемые периоды. Они зависят от скорости водообмена и от количества воды, поступающей в озеро. Согласно представленным в таблице данным наибольшим ежегодным водообменным характеризуются озера Эри и Онтарио – около  $200 \text{ км}^3/\text{год}$ . Это проточные водоемы, обладающие сравнительно небольшими объемами воды  $1640$  и  $484 \text{ км}^3$ . В ежегодный водообмен озера Байкал, самого большого по объему озера планеты ( $23026 \text{ км}^3$ ), вовлечено гораздо меньше воды –  $73 \text{ км}^3/\text{год}$ , что связано со значительно меньшим притоком в озеро с его водосбора. Наименьший водообмен характерен для оз. Иссык-Куль ( $5 \text{ км}^3/\text{год}$ ), что связано с малым поступлением воды в водоем: для местного климата характерно малое количество осадков и питание озера осуществляется только в период таяния горных ледников.

Соотношение между приходной и расходной частями среднегодового водного баланса за определенные периоды определяет характер изменения уровня воды.

Преобладание приходной части приводит к увеличению объема озера и, соответственно, возрастанию уровня воды, в то время как преобладание расходной части обуславливает снижение уровня водоема. Из таблицы 3.1 видно, что значения элементов водного баланса конкретных озер и их соотношения, приведенные для разных периодов, различаются. Это может быть связано с изменениями самих составляющих водного баланса, выбором расчетных периодов, и, наконец, возможными различиями в методике расчетов в силу того, что вышеуказанная таблица составлена на основе пяти разных источников данных.

Структура водного баланса озера Байкал в течение первой половины 20 века была уравненной – приходные компоненты соответствовали расходным. Однако в 1963-1980 гг. расходные компоненты стали преобладать за счет значительного снижения притока в озеро, увеличения стока и испарения. Такую динамику компонентов водного баланса в этот период можно объяснить созданием Иркутского водохранилища (1956-1963 гг.), подпор от которого распространился на Байкал. В период после 1981 г. устанавливается положительный водный баланс: несмотря на то, что испарение и сток продолжают возрастать, приток воды существенно увеличивается до  $67 \text{ км}^3/\text{год}$  и продолжает возрастать количество выпадающих осадков.

Вводный баланс оз. Балхаш в 1937-1969 гг. был положительным, так как сумма притока и выпадающих на акваторию осадков преобладала над испарением. Затем, в период 1970-1983 гг., расходная часть превысила приходную за счет снижения притока в озеро. Как раз на этот период приходится заполнение Капчагайского водохранилища на р. Или. В 2000-2009 гг. приток в озеро вновь увеличивается до  $15 \text{ км}^3/\text{год}$ , (как это наблюдалось до 70х годов), и водный баланс вновь становится положительным. Величины испарения и осадков за рассматриваемые периоды почти не изменялись.

Структура водного баланса оз. Иссык-Куль на протяжении 20 века изменялась с положительной на отрицательную. Так, в 1935-1980 гг. приходная часть соответствовала расходной, в 1979 гг. приходная часть была на  $0,2 \text{ км}^3$  выше расходной, а в 1990 г. расходная часть превышала приходную на  $1,0 \text{ км}^3$ . На протяжении периода 1980-1990 гг. величины компонентов водного баланса уменьшались; особенно снизилась величина притока (с  $3,6$  до  $2,3 \text{ км}^3/\text{год}$ ). К сожалению, из-за недостатка данных проанализировать динамику водного баланса данного водоема более детально не представилось возможным.

В случае оз. Ладожского отрицательная структура водного баланса, наблюдавшаяся в 1932-1980 гг., сменилась на положительную в 1981-2005 гг.

Величины всех компонентов водного баланса стали возрастать. Особенно увеличились приток в озеро ( $+3,9 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и количество выпадающих на акваторию осадков ( $+2,4 \text{ км}^3/\text{год}$ ).

Положительная структура водного баланса оз. Онежского, имевшая место в 1932-1951 гг., сменилась на отрицательную в период 1952-1980 гг., за счет значительного возрастания стока из озера. Возможно, это связано с зарегулированием озера при создании Верхне-Свирской ГЭС (1952-1953 гг.). В последующий период 1981-2005 гг., как и на Ладожском озере, происходило увеличение притока и количества выпадающих на акваторию осадков, что вызвало преобладание приходной части водного баланса над расходной. Испарение с водной поверхности незначительно возрастало на протяжении всех рассмотренных периодов, что, вероятно, связано с ростом температуры воздуха в этом регионе [6]

Все компоненты водного баланса оз. Верхнее в период 2001-2003 гг. превышали их значения в период 1959-1966 гг. При этом структура водного баланса изменилась с положительной на отрицательную, главным образом за счет увеличения испарения с водной поверхности от  $38,5$  до  $48,0 \text{ км}^3/\text{год}$ , что объясняется ростом температуры воздуха [6]

Структура водного баланса оз. Онтарио была положительной как в 1959-1966 гг., так и в 2001-2003 гг. При этом произошло увеличение расходной части за счет изменения соотношения между стоком из озера ( $+10 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и притоком в него ( $+8 \text{ км}^3/\text{год}$ ). Испарение снизилось на  $1 \text{ км}^3/\text{год}$ , а количество выпадающих на акваторию осадков за оба периода не изменилось.

Структура водного баланса оз. Эри сохранялась положительной в 1959-1966 и в 2001-2003 гг. аналогично оз. Онтарио: несмотря на снижение притока в озеро и увеличение стока из водоема, в 2001-2003 гг. приток превышал сток, а количество выпадающих на акваторию осадков ( $23 \text{ км}^3/\text{год}$ ) полностью компенсировало испарение с водной поверхности.

Чтобы более четко представить долю отдельных составляющих водного баланса, величины притока и осадков были выражены в % к приходной части, принятой за 100%, а стока и испарения - в % к расходной части, также принятой за 100% (табл. 4).

Таблица 4

Процентные доли компонентов водного баланса озер в приходной и расходной частях (Водные ресурсы России..., 2008; Водные ресурсы СССР..., 1987; Мировой водный баланс..., 1974; Brian, Nicolas, 2005; Попова и др., 2010)

Озеро	Период	Приходная часть		Расходная часть	
		Приток, км <sup>3</sup> /год	Осадки на акваторию, км <sup>3</sup> /год	Сток из озера, км <sup>3</sup> /год	Испарение с акватории, км <sup>3</sup> /год
1	2	3	4	5	6
<b>Байкал</b>	1901-1958	86,3	13,7	86,5	13,5
	1959-1962	86,6	13,4	82,6	17,4
	1963-1980	82,8	17,2	81,0	19,0
	1901-1980	82,6	17,4	81,7	18,3
	1981-2005	84,4	15,6	81,0	19,0
<b>Балхаш</b>	1936-1980	83,9	16,1	0,0	100,0
	1937-1969	80,6	19,4	0,0	100,0
	1970-1983	78,7	21,3	0,0	100,0
	2000	85,6	14,4	0,0	100,0
	2000 - 2009	80,4	19,6	0,0	100,0
<b>Иссык-Куль</b>	1935-1980	67,6	32,4	0,0	100,0
	1979	65,6	34,4	0,0	100,0
	1990	62,9	37,1	0,0	100,0
<b>Ладожское</b>	1932-1980	88,2	11,8	91,6	8,4
	1981-2005	86,3	13,7	91,4	8,6
<b>Онежское</b>	1932-1951	73,7	26,3	84,0	16,0
	1952-1980	75,6	24,4	84,3	15,7
	1969-1980	74,9	25,1	81,4	18,6
	1981-2005	72,8	27,2	83,9	16,1
<b>Верхнее</b>	1959-1966	43,3	56,7	64,4	35,6
	2001 - 2003	43,5	56,5	59,7	40,3

(Окончание таблицы 4)

1	2	3	4	5	6
<b>Онтарио</b>	1959-1966	92,9	7,1	93,8	6,3
	2001 - 2003	93,2	6,8	94,4	5,6
<b>Эри</b>	1959-1966	89,6	10,4	88,3	11,7
	2001 - 2003	89,0	11,0	88,9	11,1

Анализ данных таблицы свидетельствует о больших различиях в соотношениях между элементами водного баланса рассматриваемых озер как в приходной, так и расходной частях. Эти соотношения зависят от особенностей физико-географических условий водосбора озера и интенсивности водообмена на водосборе и в самом озере.

Основным компонентом приходной части водного баланса оз. Байкал является приток (82-86%). Поступление воды за счет осадков на акваторию играет меньшую роль и составляет от 13 до 17%. Аналогичное соотношение характерно и для расходной части водного баланса: сток из озера составляет 81-86%, а на испарение с водной поверхности приходится 13-19%. Такая структура водного баланса объясняется тем, что Байкал находится в зоне достаточного увлажнения (осадки, выпадающие на поверхность водосбора и само озеро намного превышают испарение) и является проточным озером (в него впадает около 300 рек, вытекает Ангара).

В приходной части оз. Балхаш преобладает приток - около 79-86%, а на долю осадков, выпадающих на водную поверхность, приходится всего 14-21%. Данный водоем является бессточным, поэтому единственным компонентом расходной части водного баланса является испарение. Это связано с климатическими условиями: озеро и его водосбор расположены в аридной зоне.

Водный баланс оз. Иссык-Куль отличается от рассмотренного выше баланса оз. Балхаш, несмотря на схожие климатические условия. Приток также является основным компонентом приходной части водного баланса, однако в процентном отношении его доля гораздо ниже и составляет 63-68%, тогда как доля выпадающих на акваторию осадков в отдельные годы может достигать 37%. Расходная часть водного баланса представлена только испарением с водной поверхности, поскольку озеро является бессточным.

Основным компонентом приходной части водного баланса Ладожского озера является приток (86-88%). Доля выпадающих на акваторию осадков незначительна (12-14%). Более 90% расходной части составляет сток из озера и лишь 10% - испарение.

На примере данного озера хорошо видно, что важное значение для структуры водного баланса имеет соотношение между площадью озера и площадью водосбора (так называемый показатель удельного водосбора)[1]. Водосбор данного озера, включающий в себя водосборы крупных рек и озер Северо-Запада России, превышает площадь озера в 16 раз. Озеро принимает воду со значительной территории, поэтому приток играет определяющую роль в приходной части водного баланса. Оз. Ладожское и его водосбор находятся в гумидной зоне, а потому доля испарения в водном балансе невелика, и основным элементом расходной части является сток из озера.

Приток в Онежское озеро составляет от 73 - 76% приходной части водного баланс, в то время как количество выпадающих на акваторию осадков оставляет от 14 до 17%. В расходной части преобладает сток из озера (81-84%); доля испарения не превышает 20%. Это, также, связано с расположением Онежского озера и его водосбора в гумидной зоне. Во многом процентное распределение компонентов в приходной и расходной частях водного баланса озера соответствует таковому для Ладожского озера. Однако, поскольку водосбор Онежского озера превосходит площадь самого водоема всего в 6,5 раза, доля осадков в приходной части выше, чем для случая Ладожского озера.

Распределение компонентов в приходной и расходной частях водного баланса озера Верхнее, первого в системе Великих американских озер, существенно отличается от рассмотренных выше. Более половины объема воды, поступающей в озеро, формируется за счет выпадающих на акваторию осадков (57%); доля притока несколько меньше - около 43%. На сток из озера приходится 60% расходной части, а на испарение - 36-40%. Озеро Верхнее - еще один пример, подтверждающий зависимость структуры водного баланса от показателя удельного водосбора. Так как водосбор озера превышает площадь зеркала самого водоема менее чем в 1,5 раза, водный баланс озера во многом определяется водообменом через его зеркало, т.е. осадками и испарением. Испарение, однако, играет меньшую роль в расходной части, так как данный водоем, также как и другие Великие американские озера, расположен в гумидной зоне.

Озера Онтарио и Эри, расположенные в системе Великих американских озер ниже оз. Верхнее, являются проточными. В их питании участвуют воды, формирующиеся на крупных водосборах вышерасположенных озер Верхнее, Гурон и Мичиган. Именно поэтому, в отличие от оз. Верхнее, наибольшее значение в приходной части водного баланса оз. Онтарио имеет приток: он составляет 93%, в то

время как на испарение приходится не более 7%. Аналогичное соотношение компонентов имеет расходная часть: сток составляет 94%, а испарение – всего 6%.

Структура водного баланса оз. Эри схожа с рассмотренной выше структурой водного баланса оз. Онтарио. Основную роль в приходной части играет приток (89%); оставшиеся 11% формируются за счет выпадающих на акваторию водоема осадков. Основным компонентом расходной части является сток (88%). Доля испарения невелика – всего 12%.

Обобщив все выше сказанное, можно сделать следующие выводы:

Структура водного баланса озера зависит от комплекса физико-географических условий водосбора и морфометрических характеристик самого водоема: объема озера, соотношения между площадью озера и площадью водосбора, проточности водоема, климатических условий региона (в том числе степени увлажнения), основного источника питания (снеговое, ледниковое и др.);

Наибольший объем ежегодного водообмена характерен для озер Онтарио и Эри - проточных водоемов, обладающих сравнительно небольшими объемами воды, но находящихся в нижнем звене Великих американских озер, связанных между собою системами водотоков и каналов. Наименьший объем ежегодного водообмена характерен для оз. Иссык-Куль, что связано с малым поступлением воды в этот бессточный водоем.

Как количественные значения основных элементов водного баланса, так и их соотношения меняются в зависимости от рассматриваемого периода. Для всех озер и большинства рассмотренных периодов характерен положительный водный баланс. Отрицательный водный баланс имел место для четырех озер Евразии в различные периоды до 1980 г. (1932-1980 – оз. Ладжское; 1952-1980 – оз. Онежское; 1963-1980 – оз. Байкал; 1970-1983 оз. Балхаш), а также для оз. Иссык-Куль - в 1990 году и для оз. Верхнее в период 2001-2003 гг.

Основными особенностями структуры водного баланса рассматриваемых озер являются следующие:

- Основными компонентами водного баланса озер Байкал, Онежское, Ладжское, Онтарио и Эри являются приток и сток (от 70 до 90% и более).

- Основным компонентом приходной части озер Балхаш и Иссык-Куль является приток (около 80% для оз. Балхаш и более 60% для оз. Иссык-Куль), формирующийся за счет таяния ледников. Расходная часть водного баланса представлена испарением, так как озера являются бессточными.

- Основными компонентами приходной части водного баланса озера Верхнее являются осадки (57%), а расходной части – испарение (65%). Данная особенность связана с тем, что водный баланс озера во многом определяется водообменом через его зеркало (показатель удельного водосбора менее 1,5).



#### 4. Особенности многолетней динамики уровней воды озер

Многолетние изменения уровней воды озер были проанализированы с помощью хронологических графиков их среднегодовых значений и разностных интегральных кривых. Для выявления роли метеорологических факторов в динамике уровней озер те же кривые были использованы для анализа соответствующих многолетних изменений температуры воздуха и количества осадков на ближайших метеостанциях.

##### 4.1 Результаты анализа многолетней динамики уровней воды озер с использованием хронологических графиков

В качестве исходных данных использованы ряды многолетних наблюдений за уровнем воды озер, температурой воздуха и количеством осадков за период 1960-2016 гг.

Для оз. Байкал, в основном, характерны многочисленные непродолжительные (1 – 2 года) колебания уровня воды малой амплитуды (0,1 – 0,2 м). Лишь в период с 1963 по 1985 гг. наблюдалось сначала снижение уровня (на 1,2 м) до 1981 г., а затем его резкий подъем к 1985 г. Заметное снижение уровня началось с 2014 года (Рис. 4).

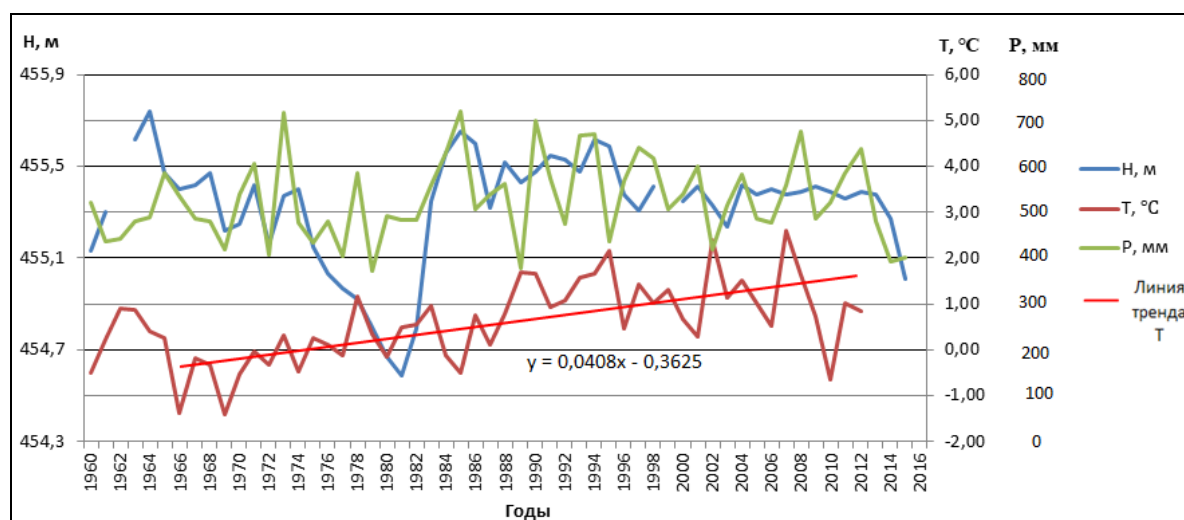


Рис. 4. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Байкал (п. Бабушкин), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Бабушкин)

Выраженные направленные изменения в многолетнем ходе осадков отсутствуют. Амплитуда колебаний среднегодовых значений осадков составляет 100-150 мм с периодичностью от 1 года до 3 лет.

В многолетней динамике температуры воздуха отмечается тенденция ее увеличения, начиная с 1966 г. Согласно результатам проверки ряда с помощью критерия Стьюдента (Шелутко, 2007) при уровне значимости 1%, данный тренд является значимым<sup>5,6</sup>.

В целом следует отметить, что хронологический ход среднегодовых уровней озера слабо коррелирует с соответствующим ходом рассмотренных метеоэлементов.

Динамика уровней воды озера Балхаш характеризуется выраженными направленными изменениями, имеющими продолжительный характер. Так, с 1960 по 1987 гг. уровень воды снижался, упав к концу периода на 2,5 м; после чего начался его рост и к 2011 году он достиг отметки 1960 года (Рис. 5).

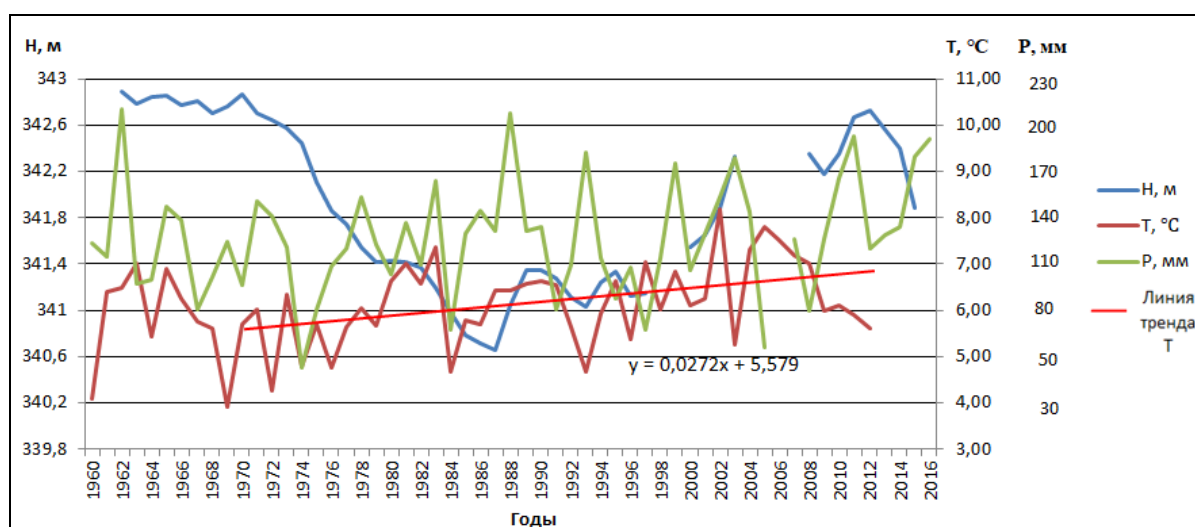


Рис. 5. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Балхаш (п. Мынарал), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Балхаш)

Выраженные однонаправленные изменения в многолетнем ходе осадков отсутствуют. Амплитуда колебаний среднегодовых значений осадков составляет 50-150 мм, а периодичность колебаний - 2-3 года.

В многолетней динамике среднегодовой температуры воздуха отмечается тенденция ее увеличения, начиная с 1970 г. Согласно результатам проверки ряда с помощью критерия Стьюдента при уровнях значимости 5% и 1%, данный тренд является значимым.

Также, как и в предыдущем случае, для оз. Балхаш следует отметить, что хронологический ход среднегодовых уровней озера слабо коррелирует с соответствующим ходом рассмотренных метеоэлементов.

<sup>5</sup> <http://matstats.ru/kt.html>

<sup>6</sup> <http://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica/>

Кривая хронологического хода уровней воды оз. Иссык-Куль напоминает аналогичный график для оз. Балхаш: длительная фаза спада до 1999 г. (падение уровня на 2,5 м.) и затем фаза подъема. Однако в отличие от оз. Балхаш, к 2016 г. уровень не восстановился, а поднялся всего на 0,8 м. (Рис. 6).

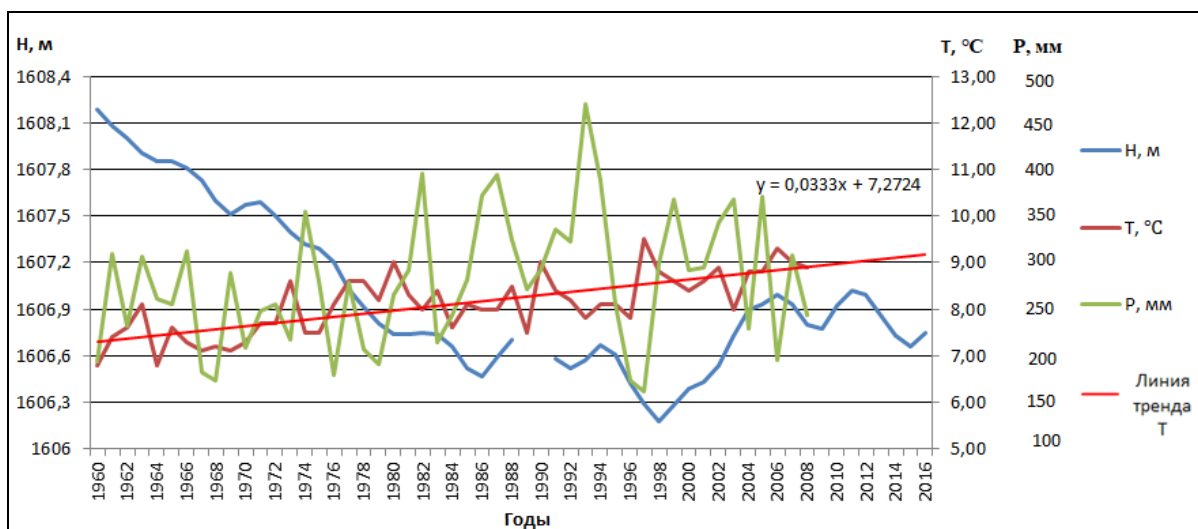


Рис. 6. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Иссык-Куль (п. Чолпон-Ата), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Чолпон-Ата)

Явно выраженные однонаправленные изменения в многолетнем ходе осадков отсутствуют. Амплитуда среднегодовых значений осадков составляет 50-150 мм с периодичностью 2-3 года. Лишь в период с 1977 по 1999 гг. наблюдался большой размах колебаний (от 130 до 400 мм в год).

В многолетней динамике среднегодовой температуры воздуха отмечается непрерывная тенденция ее увеличения. Согласно результатам проверки ряда с помощью критерия Стьюдента при уровнях значимости 5% и 1%, данный тренд является значимым.

Как и в предыдущих случаях, хронологический ход среднегодовых уровней озера слабо коррелирует с соответствующим ходом рассмотренных метеозаэментов.

Для Ладожского озера характерны короткопериодические (от 1 года до 5 лет) колебания среднегодовых уровней значительной амплитуды (до 1,4 м). В динамике уровней данного водоема выделяются 3 хорошо выраженных цикла колебаний: до 1973 г., 1973-2003 гг., после 2003 года (Рис. 7).

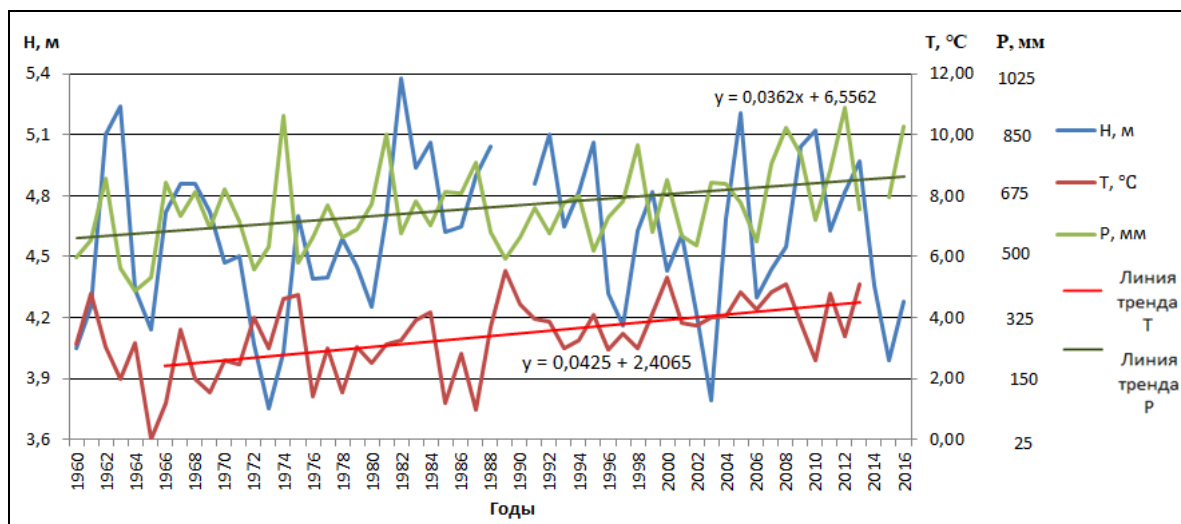


Рис. 7. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Ладожское (п. Валаам), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Сортавала)

Многолетний ход осадков слабо коррелирует с ходом уровней воды с запаздыванием на 1-2 года и имеет тенденцию к повышению. Температура воздуха с 1966 года имеет тенденцию к повышению. Для обоих трендов была проверена гипотеза о значимости при 5% и 1% уровнях значимости с помощью критерия Стьюдента. Так как гипотеза подтвердилась и данные тренды следует признать значимыми.

Для Онежского озера (также как и для Ладожского) характерны короткопериодические колебания уровня длительностью до 3 лет и амплитудой до 0,5 м. Как и в динамике уровня Ладоги, для Онежского озера можно также выделить 3 цикла колебаний: до 1972 г., 1972-2003 гг., после 2003 года (Рис. 8).

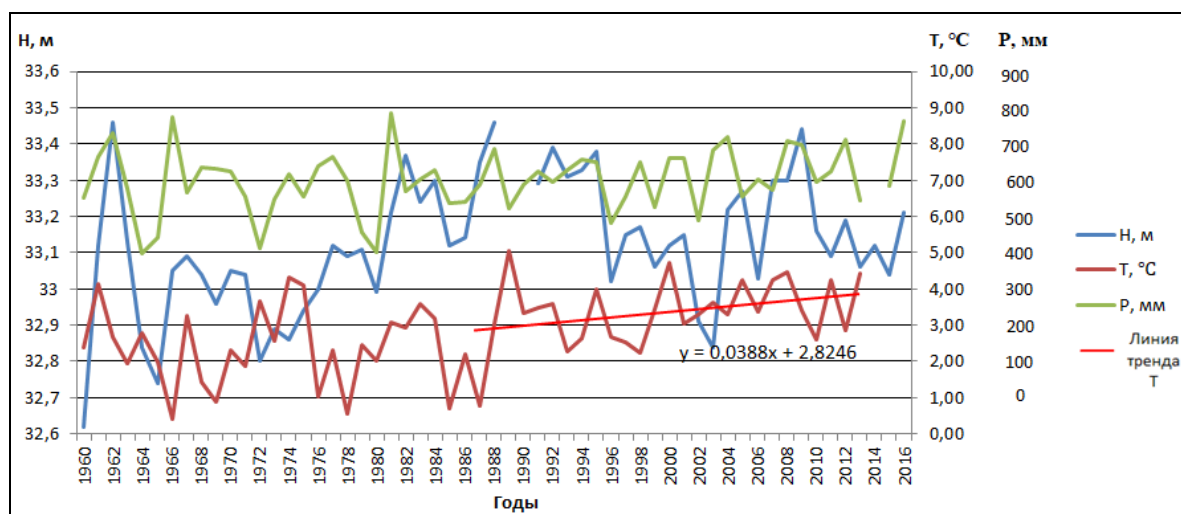


Рис. 8. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Онежское (г. Петрозаводск), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Петрозаводск)

Направленные изменения в многолетней динамике осадков отсутствуют. После 1990<sup>ых</sup> гг. отмечается уменьшение амплитуды их многолетних колебаний. График хода уровней хорошо коррелирует с ходом осадков.

В многолетней динамике среднегодовой температуры воздуха отмечается тенденция ее увеличения, начиная с 1987 г. Согласно результатам проверки ряда с помощью критерия Стьюдента при уровнях значимости 5% и 1%, данный тренд является незначимым. Здесь необходимо отметить, что с начала 80<sup>х</sup> годов хронологические графики хода уровня воды и температуры воздуха в значительной мере повторяют друг друга.

Для озера Верхнее характерны короткопериодные колебания уровня продолжительностью 1-3 года. Вместе с тем четко выделяются два длительных цикла колебаний уровня – до и после 1987 г. (рис. 9).

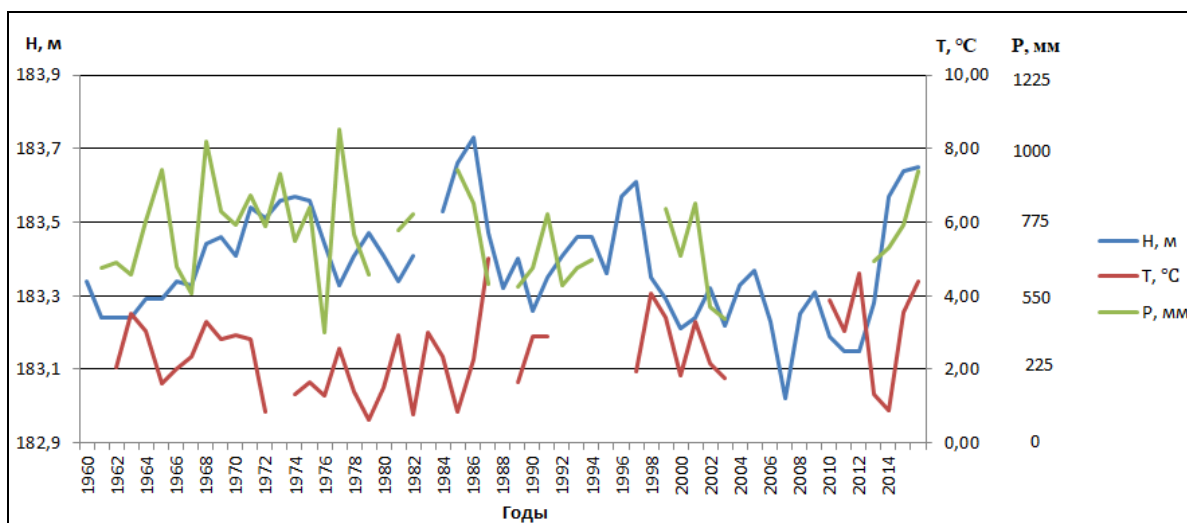


Рис. 9. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Верхнее (п. Дулут), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Тауэр-2С)

В многолетней динамике осадков и температуры воздуха значимых однонаправленных тенденций не выявлено. Однако, график многолетнего хода осадков достаточно хорошо коррелируется с графиком хода среднегодовых уровней (со сдвигом на 1-2 года). К сожалению, частые пропуски в наблюдениях вносят некоторую неопределенность в результаты анализа.

Динамика уровней оз. Онтарио характеризуется наличием короткопериодных колебаний уровня разной амплитуды от нескольких сантиметров до 0,5 м и

продолжительностью 1-3 года (рис. 10). Как и для оз. Верхнее, здесь можно выделить два цикла колебаний уровня – до и после 1987 г.

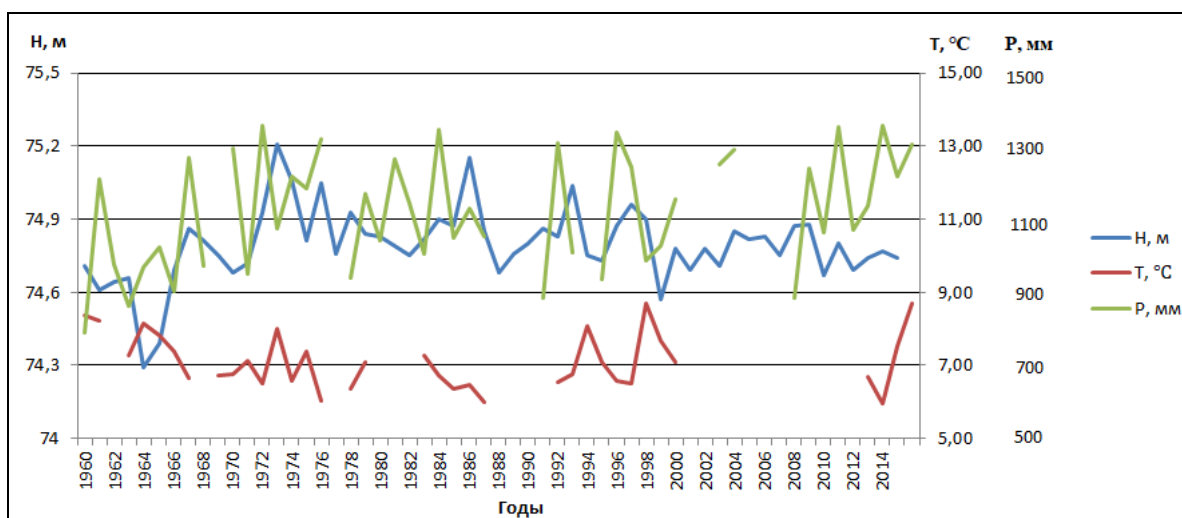


Рис. 10. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Онтарио (п. Рочестер), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Элледжани Стейт Парк).

В многолетней динамике осадков значимых однонаправленных тенденций не выявлено. Однако, как и в предыдущем случае, график многолетнего хода осадков достаточно хорошо коррелируется с графиком хода среднегодовых уровней (со сдвигом на 1-2 года).

Закономерности хода среднегодовой температуры воздуха установить оказалось сложно из-за частых пропусков в наблюдениях.

Динамика среднегодовых уровней озера Эри имеет те же характерные особенности, что и динамика уровней озер Верхнее и Онтарио. Как и в двух предыдущих случаях для оз. Эри можно выделить два цикла колебаний уровня – до и после 1987 г. (рис. 11).

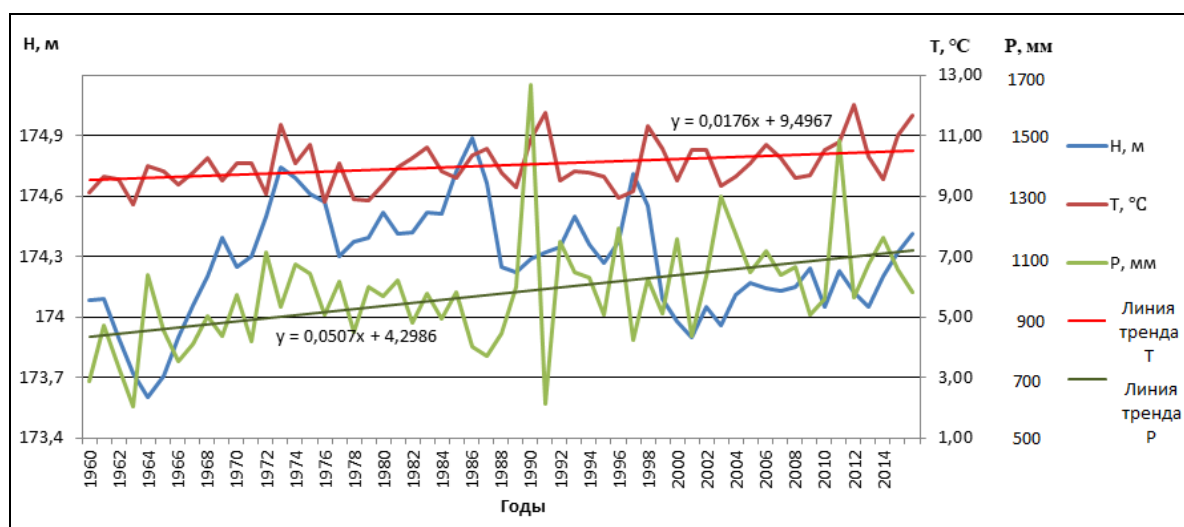


Рис. 11. Динамика многолетних колебаний уровня воды (Н) оз. Эри (п. Кливленд), температуры воздуха (Т) и количества осадков (Р) (метеостанция Экрон Кентон Эйрпорт)

В многолетней динамике осадков прослеживается тенденция их увеличения за рассматриваемый период. Согласно результатам проверки ряда с помощью критерия Стьюдента при уровнях значимости 5% и 1%, данный тренд является значимым. Как и в предыдущих случаях, график многолетнего хода осадков достаточно хорошо коррелируется с графиком хода среднегодовых уровней (со сдвигом на 1-2 года).

График хода среднегодовой температуры воздуха свидетельствует о ее слабом росте к концу рассматриваемого периода. Как и в случае хода осадков, данный тренд был оценен как значимый.

На основании выполненного анализа многолетних колебаний среднегодовых уровней воды рассматриваемых озер и сопутствующих метеоэлементов с использованием хронологических графиков, можно сделать следующие основные выводы:

1. Для озер, зона формирования стока которых расположена в горах (Байкал, Балхаш, Иссык-Куль), четко выделяется достаточно длительная фаза снижения уровней с начала 1960<sup>х</sup> годов. На оз. Байкал это снижение продолжалось до 1981 г., на оз. Балхаш до 1987 г. и на оз. Иссык-Куль до 1999 г. Затем началась фаза роста уровней воды. Однако, если для озер Байкал и Балхаш к началу 2000<sup>ых</sup> уровни достигли отметок начала 60<sup>х</sup> годов, то для оз. Иссык-Куль уровень вырос всего на 0,8 м. (при его падении на 2,5 м. с начала 60<sup>х</sup>). Следует иметь в виду, что на режим уровней оз. Балхаш повлияло заполнение Капчагайского водохранилища на р. Или в 70х годах.

Хронологический ход среднегодовых уровней вышеуказанных озер слабо коррелирует с соответствующим ходом рассмотренных метеозаэлементов.

2. Для Ладожского и Онежского озер характерны короткопериодические колебания среднегодовых уровней длительностью до 3 лет и амплитудой от 0,5 м до 1 м и более. В динамике уровней этих озер можно выделить 3 цикла колебаний: до 1972 г., 1972-2003 гг., после 2003 года. Хронологические графики хода уровня воды данных озер и температуры воздуха в значительной мере повторяют друг друга. С начала 90<sup>х</sup> они находятся в противофазе. Также существует корреляция между многолетним ходом уровней воды озер и количеством осадков; для Ладожского озера она проявляется с запаздыванием хода уровня на 1-2 года.

3. Для трех рассмотренных озер системы Великих американских озер (Верхнее, Онтарио и Эри) динамика уровней характеризуется наличием короткопериодных колебаний разной амплитуды от нескольких сантиметров до 0,5 м и продолжительностью 1-3 года. Другой характерной особенностью является наличие двух длительных циклов колебаний уровня – до и после 1987 г. Важным обстоятельством является также то, что для указанных озер графики многолетнего хода осадков достаточно хорошо коррелируют с графиками хода среднегодовых уровней (с запаздыванием хода уровня на 1-2 года). Данное обстоятельство подтверждает важную роль осадков в формировании среднегодовых уровней этих озер. Как было отмечено в главе 2, для Великих американских озер именно осадки являются основным компонентом приходной части водного баланса.

4. Положительные линейные тренды на графиках среднегодовых температур воздуха по метеостанциям Бабушкин, Балхаш, Чолпон-Ата, Сортавала и Экрон Кентон Эйрпорт были оценены как значимые. Это свидетельствует о произошедшем потеплении климата в бассейнах озер Байкал, Балхаш, Иссык-Куль, Ладожское и Эри. Значимые тренды также обнаружены на графиках многолетнего хода количества осадков по метеостанциям Сортавала и Экрон Кентон Эйрпорт.

Для выявления цикличности в многолетних рядах уровней воды рассматриваемых озер с учетом цикличности осадков и температуры воздуха, были рассмотрены и сопоставлены соответствующие разностные интегральные кривые. Результаты анализа цикличности представлены в следующем разделе.



## 4.2 Результаты анализа многолетней динамики уровней воды озер с использованием разностных интегральных кривых

Разностные интегральные кривые «представляют собой нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднего многолетнего значения временного ряда на конец каждого года» (Рекомендации по расчету..., 2017).

Построение разностных интегральных кривых было выполнено по стандартной методике, изложенной в Методических указаниях к практикуму по воднобалансовым расчетам (Вуглинский и др., 2012).

Разностные интегральные кривые были построены для многолетних рядов уровней воды озер и ряда сопутствующих метеоэлементов (температура воздуха и осадки). Метеоданные были получены по ближайшим к озерам метеостанциям.

На графиках, представленных ниже, по горизонтальной оси отложены годы, по вертикальной - отклонения коэффициентов от единицы по отношению к коэффициенту вариации:  $\frac{(K_i - 1)}{C_v}$ . Коэффициент вариации  $C_v$  определялся по формуле:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}}, \text{ где}$$

$n$  – количество членов ряда,  $K_i$  – коэффициент. При этом:

$$K_i = L_i / L_0,$$

где  $L_0$  – среднее значение рассматриваемой характеристики,  $L_i$  – значение рассматриваемой характеристики  $i$ -того члена ряда.

Из приведенных выше формул следует, что если коэффициент  $K_i > 1$ , то значение по оси ординат будет положительным, и разностная интегральная кривая будет возрастать; если  $K_i < 1$ , то значение по оси ординат будет отрицательное, и разностная интегральная кривая будет убывать. Следовательно, возрастание интегральных кривых характеризует фазы повышенной водности (уровень воды), потепления (температура воздуха) или повышенного увлажнения (количество осадков), а убывание – пониженной водности (уровень воды), похолодания (температура воздуха) или пониженного увлажнения (количество осадков). То есть в отличие от хронологических графиков, эти кривые характеризуют длительные фазы с однонаправленной тенденцией возрастания или убывания рассматриваемой величины.

Период от максимума до максимума или от минимума до минимума принято считать полным циклом, а интервалы от минимума до максимума (от максимума до минимума) - фазами. Ниже представленными результатами анализа многолетней динамики уровней воды озер и сопутствующих метеозадаментов с использованием разностных интегральных кривых.

Для оз. Байкал (пост Бабушкин) выделяется один полный цикл колебаний уровня (1968 – 2013 гг.) с переломной точкой в 1982 г. и две фазы: многоводная (1983–2013 гг.) и маловодная (1968 – 1982 гг.) (Рис. 12).

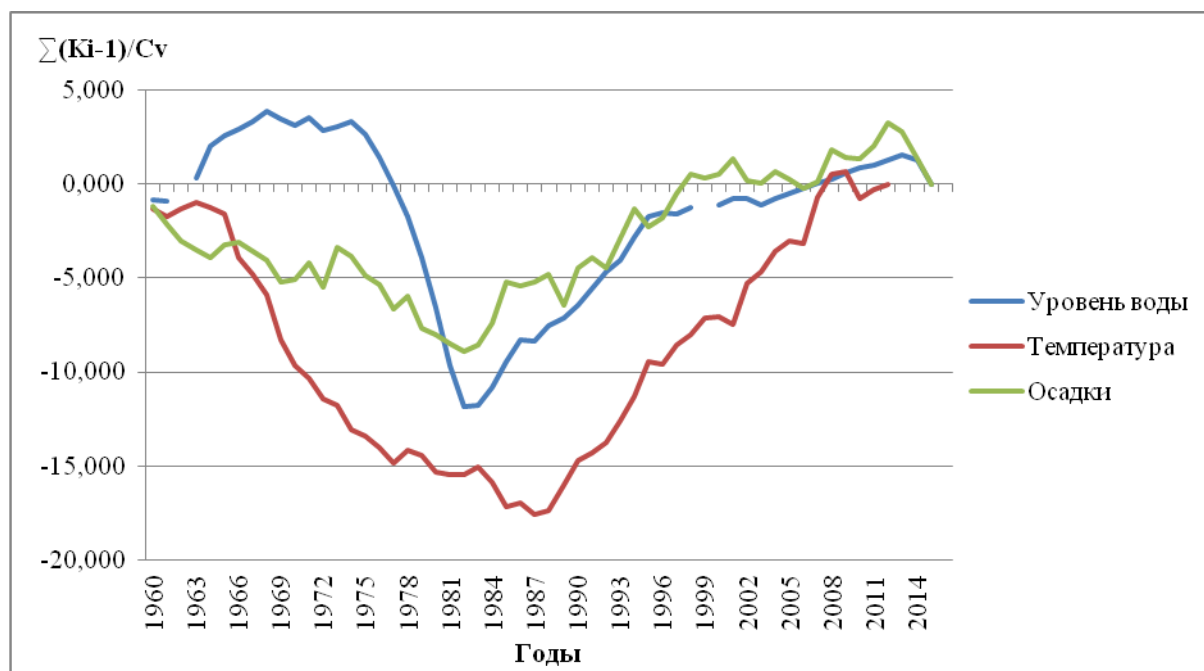


Рис. 12. Разностные интегральные кривые (п. Бабушкин на оз. Байкал, метеостанция Бабушкин)

Интегральные кривые осадков и температуры воздуха повторяют ход кривой уровня воды. При этом, если граница перелома фаз для уровня воды и осадков совпадает (1982 г.) то для температуры воздуха переломной точкой является 1987 г.

Отмеченные закономерности поведения разностных интегральных кривых свидетельствуют о том, что в пределах рассматриваемого периода четко выявляется один полный цикл колебаний всех рассмотренных элементов.

В динамике хода уровня воды оз. Балхаш выделяется один полный цикл, состоящий из многоводной (1960-1973 гг.) и маловодной (1973-2000 гг.) фаз (рис. 13).

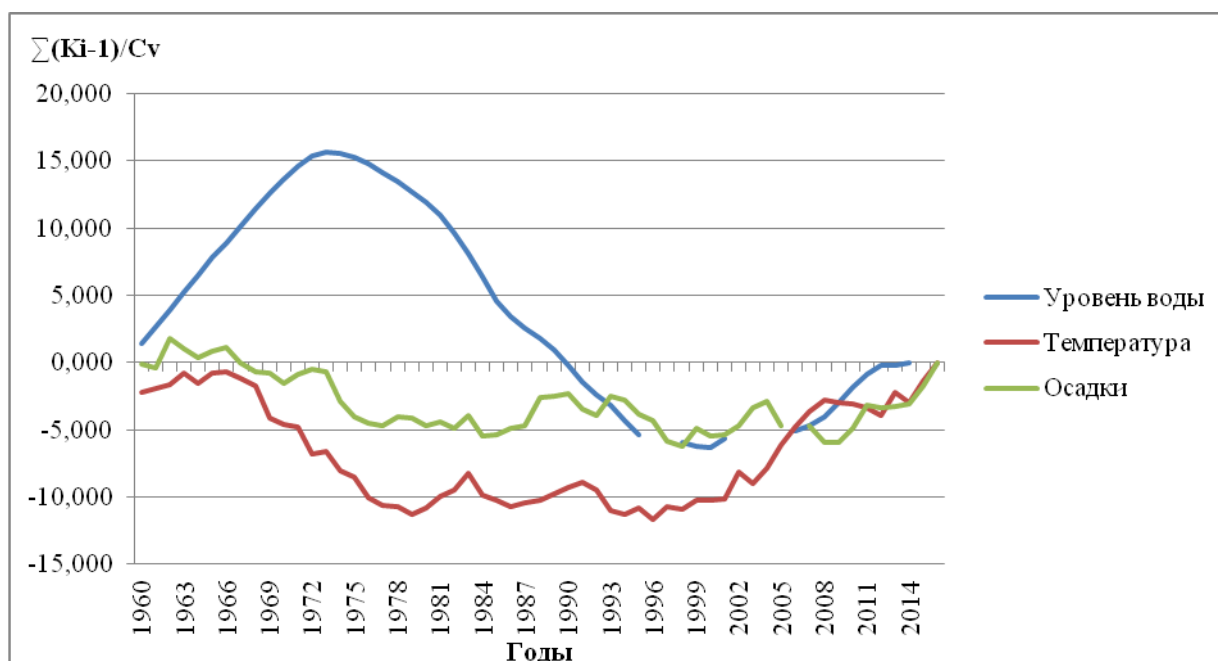


Рис. 13. Разностные интегральные кривые (пост п. Мынарал на оз. Балхаш, метеостанция Балхаш)

По интегральной кривой температуры воздуха также прослеживается полный цикл колебаний - с 1966 по 2014 гг. До 1980 года – фаза снижения температур воздуха, затем затяжной период низких температур и с 1996 – фаза их роста.

Интегральная кривая количества осадков повторяет ход интегральной кривой температуры воздуха, но с задержкой на несколько лет.

Можно предположить, что рост уровней воды в оз. Балхаш в 60х годах происходил во время фазы повышенной водности в бассейне озера (высокие осадки), которая закончилась к началу 70<sup>х</sup> годов. С усилением засушливости климата (уменьшение осадков) уровни озера начинают снижаться, а затем, с наступлением влажной фазы, расти и цикл заканчивается в начале 2000<sup>х</sup>. О такой динамике свидетельствует и хронологический график хода уровней (см. раздел 3.1).

Здесь следует отметить, что на снижение уровня оз. Балхаш повлияло, также, заполнение Капчагайского водохранилища на р. Или в 70х годах, хотя ежегодные объемы изъятий из р. Или были несопоставимыми с притоком в оз. Балхаш по этой реке.

В динамике хода уровня оз. Иссык-Куль также выделяется один цикл с двумя фазами: многоводной 1960-1977 гг. и маловодной 1977 – 2016 гг. (Рис. 14).

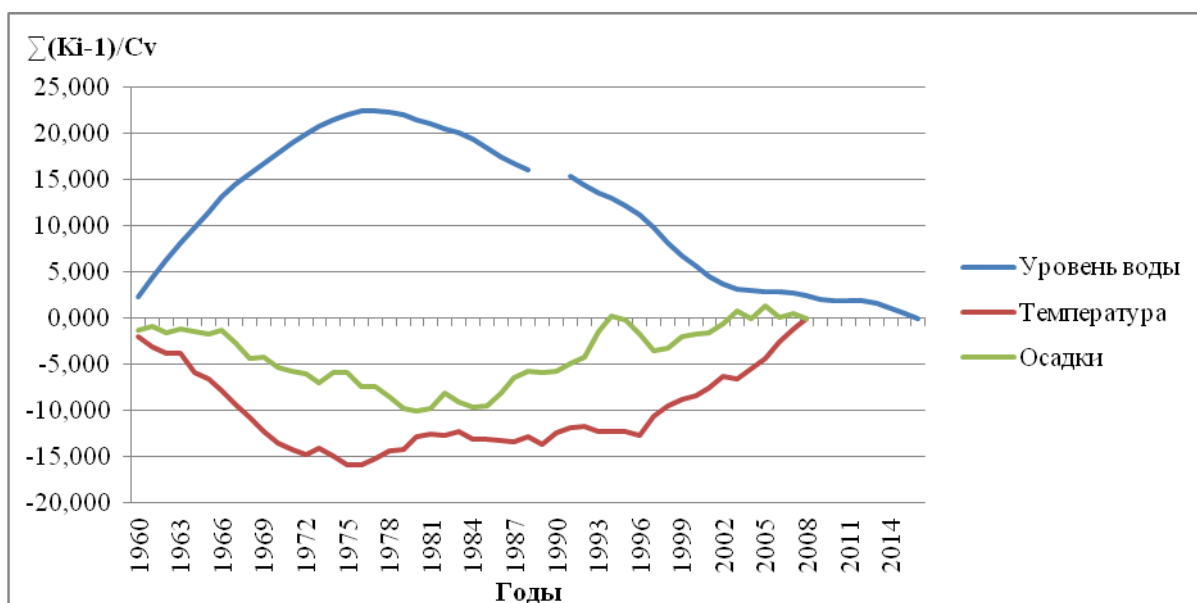


Рис. 14. Разностные интегральные кривые (пост п. Чолпон-Ата на оз. Иссык-Куль, метеостанция Чолпон-Ата)

На кривой хода температуры воздуха также выделяется один цикл с двумя фазами – снижения температуры до 1976 года и затем повышения температуры.

Интегральная кривая количества осадков повторяет интегральную кривую температуры воздуха, но с запаздыванием на несколько лет. На ней также выделяется один цикл с двумя фазами – уменьшения осадков до 1981 года и затем их роста.

Следует отметить, что интегральная кривая уровней воды находится в противофазе к интегральным кривым температуры воздуха и осадков.

В динамике уровня воды Ладожского озера выделяются два длительных цикла колебаний водности: с 1963 по 1995 гг. и с 1995 по 2013 гг. с переломными точками в 1980 и 2003 гг. соответственно (Рис. 15).

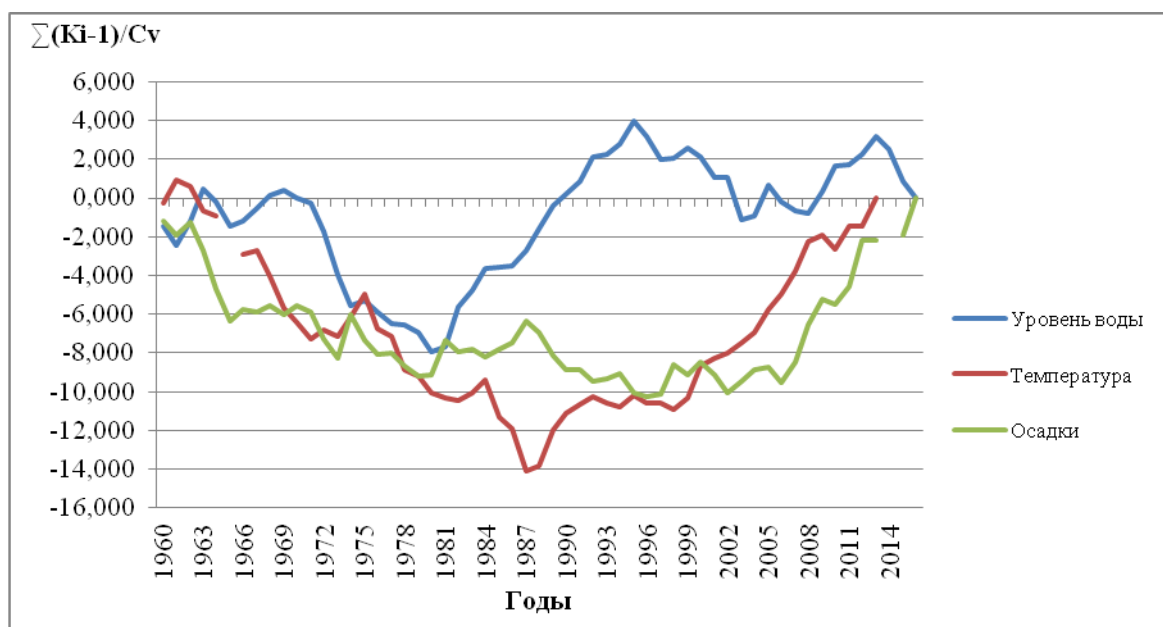


Рис. 15. Разностные интегральные кривые (пост п. Сортавала на оз. Ладожское, метеостанция Сортавала)

На кривой температуры воздуха можно выделить один продолжительный цикл с двумя фазами: похолодания в 1961-1987 и потепления в 1987-2016 гг. Ход кривой изменения осадков аналогичен ходу кривой температуры воздуха с небольшими отклонениями. Важно отметить, что обе кривые находятся в противофазе с кривой уровня воды. Указанные обстоятельства подтверждают сделанный в предыдущем разделе вывод о слабой связи колебаний уровня озера с рассмотренными метеозлементами.

Как и в предыдущем случае, в ходе уровня воды Онежского озера выделяются 2 цикла: 1963-1995 с переломной точкой в 1980 году и 1995-2012 с переломной точкой в 2003 году (Рис. 16).

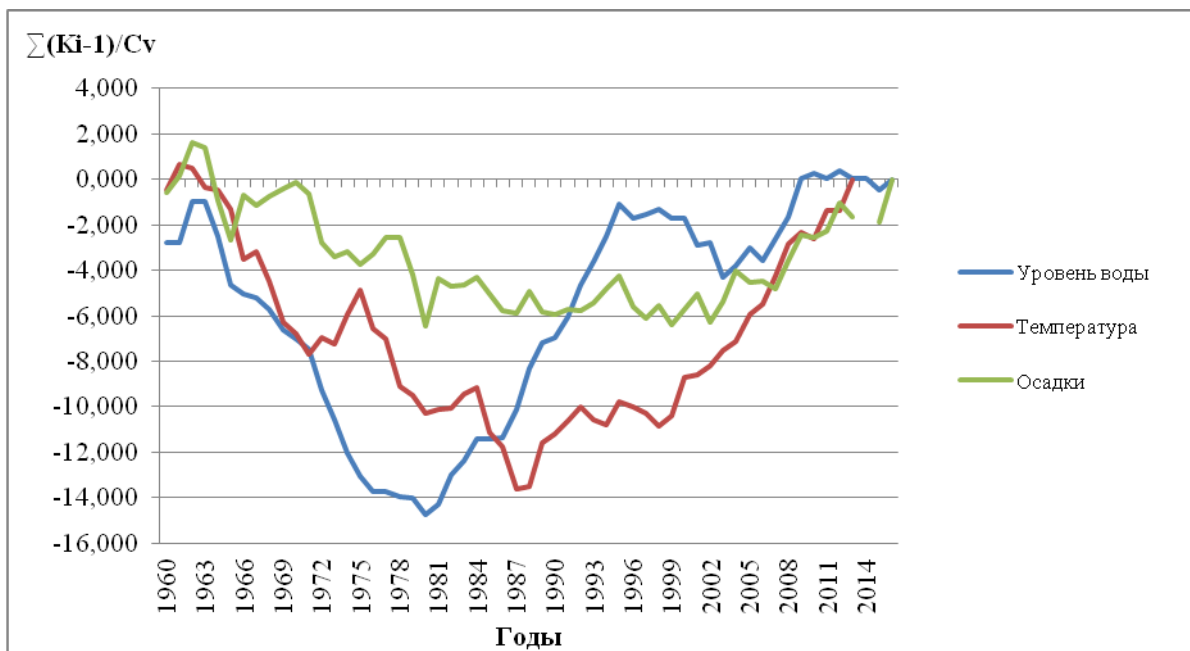


Рис. 16. Разностные интегральные кривые (пост г. Петрозаводск на оз. Онежское, метеостанция Петрозаводск)

На графике изменения температуры воздуха выделяется один полный цикл с двумя фазами: похолодания 1960 - 1987 гг. и потепления 1987-2016 гг., которые включают в себя по несколько более коротких циклов колебания продолжительностью до 10 лет. При этом, график колебаний температуры воздуха синхронен графику колебаний уровней воды с некоторым его опережением.

На интегральной кривой количества осадков также выделяется один полный цикл с двумя фазами.

Разный характер цикличности уровней воды и рассмотренных метеоэлементов указывает на слабую связь колебаний уровня озера с колебаниями последних.

В динамике уровня воды озера Верхнее выделяется один полный цикл колебаний уровня с двумя фазами: подъема с 1967 по 1998 гг. и спада с 1999 по 2013 гг. (рис. 17).

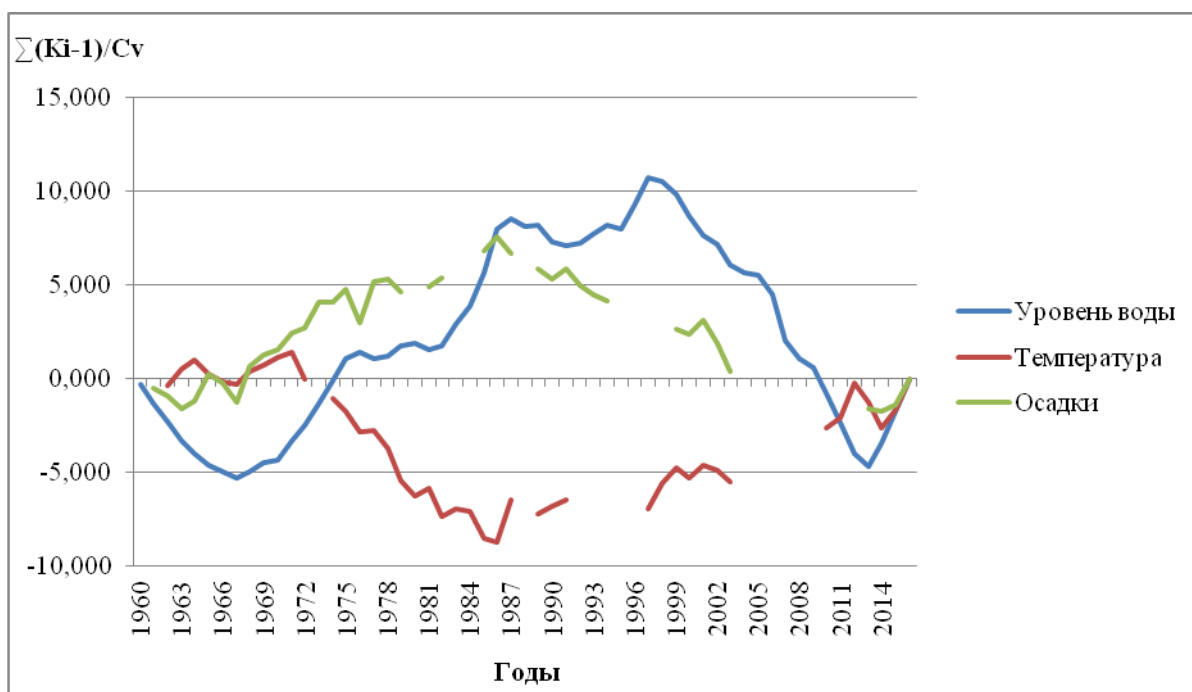


Рис. 17. Разностные интегральные кривые (пост п. Дулут на оз. Верхнее, метеостанция Тауэр-2С)

На графике хода осадков также выделяется один полный цикл и он в основном повторяет график уровней воды, но с некоторым запаздыванием. График температуры воздуха также с одним циклом, но ее ход находится в противофазе к ходу уровней воды и осадков.

В динамике уровня воды озера Онтарио также выделяется один незаконченный цикл колебаний уровня с двумя фазами: подъема с 1971 по 2000 гг. и последующей незаконченной фазой спада (рис. 18). Внутри каждой фазы можно выделить циклы колебаний длительностью до 10 лет.

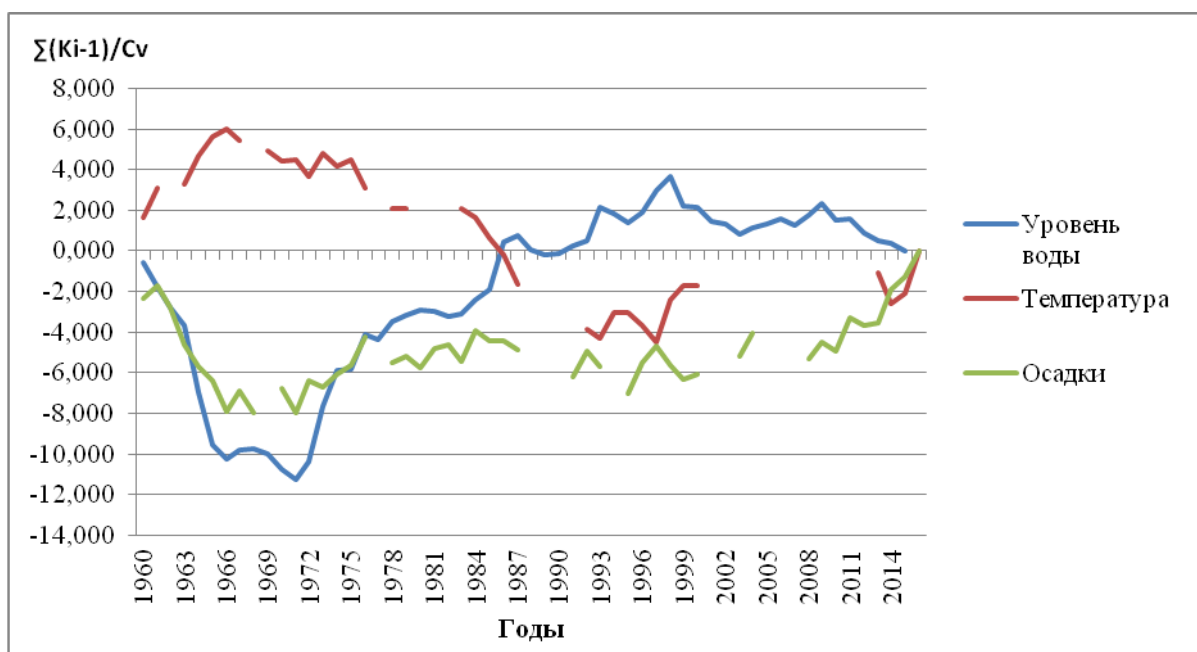


Рис. 18. Разностные интегральные кривые (пост п. Онтарио на оз. Онтарио, метеостанция Элледжани Стейт Парк)

В противофазе к уровню воды изменяется температура воздуха. С конца 1960<sup>x</sup> начинается фаза похолодания, которая в 1998 г. сменяется на фазу потепления.

На интегральной кривой количества осадков, которая в значительной мере повторяет ход уровня воды, также выделяется один цикл колебаний, однако переломную точку смены фаз установить трудно из-за частых пропусков в наблюдениях.

Аналогично описанным выше интегральным кривым озер Верхнее и Онтарио, интегральная кривая оз. Эри демонстрирует один полный цикл колебаний уровня с двумя фазами – подъема и спада с переломной точкой в 1998 г. (рис. 19).



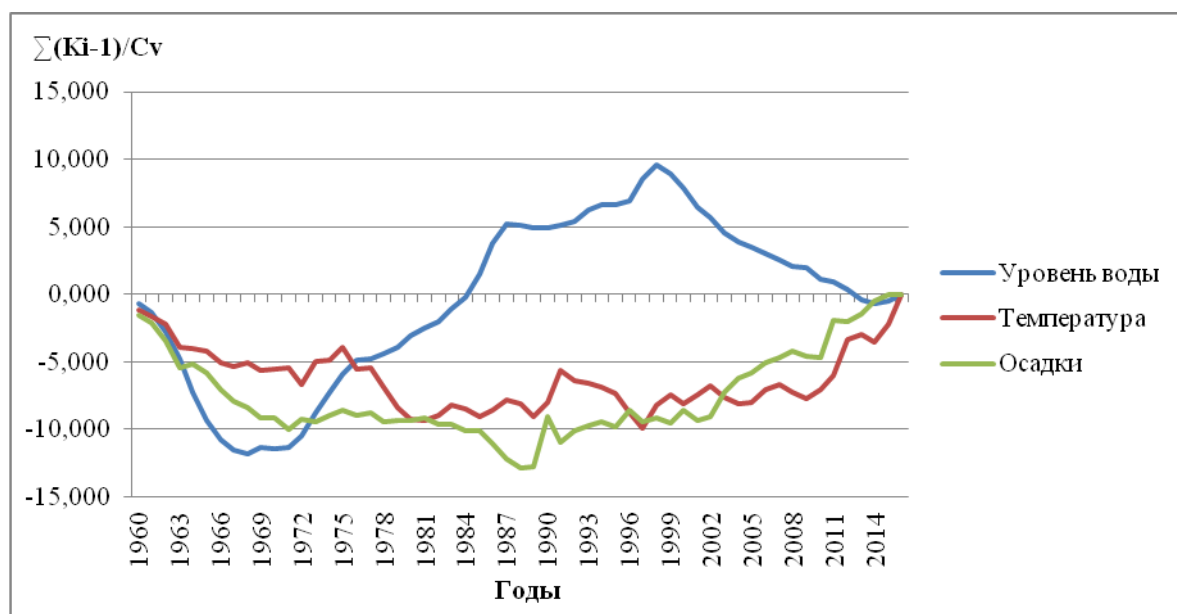


Рис. 19. Разностные интегральные кривые (пост п. Кливленд на оз. Эри, метеостанция Экрон Кентон Эйрпорт)

На интегральных кривых температуры воздуха и осадков также выделяется один цикл колебаний этих метеоэлементов, однако ход этих кривых находится в противофазе к кривой изменения уровня воды.

Выполненный анализ разностных интегральных кривых многолетних рядов уровней воды озер и сопутствующих метеоэлементов (температура воздуха и осадки) для 8 выбранных озер позволяет сделать следующие основные выводы:

1. На всех озерах в пределах анализируемого периода (1960-2016 гг.) четко прослеживается один полный цикл колебаний уровней воды и рассмотренных сопутствующих метеоэлементов длительностью около 48 лет.

2. Для ряда озер кривые хода метеоэлементов находятся в противофазе к ходу уровня воды (озера Иссык-Куль, Балхаш – температура воздуха и осадки, оз. Ладожское и Великие Американские озера – температура воздуха). Для других озер отмечается синхронность хода кривой уровня воды и кривых метеоэлементов (озера Байкал, Онежское - температура воздуха и осадки, Верхнее - осадки).

3. Построенные разностные интегральные кривые позволили выделить циклы и фазы в многолетних колебаниях уровня воды и рассмотренных метеоэлементов. Однако для анализа возможных взаимосвязей между многолетними колебаниями уровней воды озер и сопутствующих метеоэлементов необходимо обязательное привлечение и анализ хронологических графиков многолетнего хода соответствующих компонентов.

## 5. Особенности внутригодового хода уровней озер

Внутригодовой ход уровня воды зависит от изменения соотношений между компонентами водного баланса озера. Преобладание компонентов расходной части уравнения водного баланса приводит к падению уровня, а преобладание компонентов приходной части – к его росту.

Водосборы пяти озер расположены на равнинной территории в зоне избыточного увлажнения, поэтому питание осуществляется преимущественно за счет весеннего снеготаяния и подъем уровня происходит в весенний период, достигая максимума в июне – июле. Зоны формирования стока еще трех водоемов расположены в горных и предгорных районах; их питание зависит от осадков и таяния ледников, а потому максимальные значения уровня воды приходится на весну или лето-осень.

Вместе с тем, каждый водоем обладает уникальными морфометрическими и физико-географическими характеристиками, во многом определяющими свойственные только ему особенности внутригодового режима уровней воды.

Анализ внутригодового режима уровней воды был выполнен с использованием:

- графиков среднееголетних месячных значений уровней воды рассматриваемых озер за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.;
- совмещенных графиков среднееголетних месячных значений температуры воздуха и количества осадков за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.

Ниже представлены результаты анализа по каждому из восьми рассмотренных озер.

Внутригодовое распределение среднееголетних месячных значений уровня воды оз. Байкал за два периода 1960-1979 и 1980-2016 гг. представлено на рисунке 20.

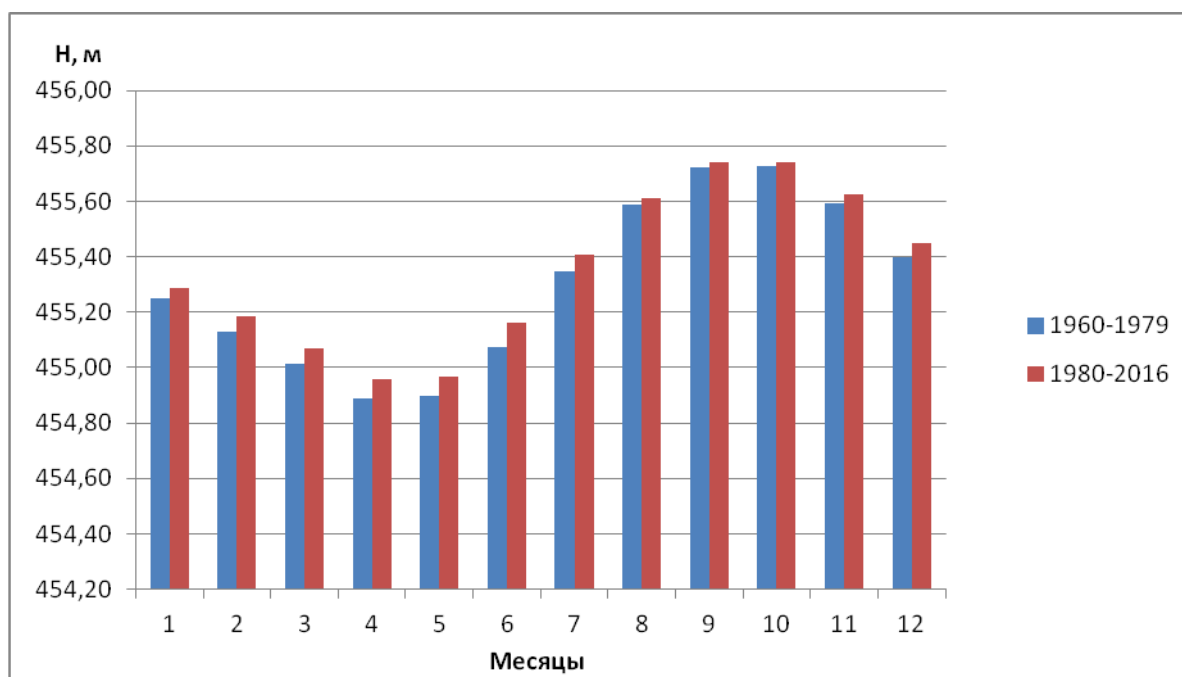


Рис. 20. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Байкал (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

На режим уровня озера Байкал влияют как природные, так и антропогенные факторы. К первым относится расположение области питания озера в горном районе с достаточным увлажнением; ко вторым – регулирование режима уровней воды плотиной Иркутской ГЭС. Так, наибольшие уровни воды, наблюдаемые в конце лета - начале осени, связывают с выпадением дождей (Румянцев и др., 2012).

По рисунку 5.1 видно, что внутригодовой режим озера Байкал характеризуется снижением уровней воды в весенний период и повышением в летне-осенний период. Многолетняя амплитуда колебаний уровня составила 0,83 м за первый период и 0,78 м за второй период. Значения уровня для всех месяцев за период 1960-1979 гг. оказались на несколько сантиметров ниже, чем за период 1980-2016 гг. В целом же характер внутригодового режима уровней и за первый и за второй периоды оказался неизменным. Анализ внутригодового режима уровней за отдельные годы также подтвердил его соответствие типовому ходу уровней, полученному при анализе среднемноголетних значений. Во многом это связано с регулированием стока из озера Иркутской ГЭС.

Одновременно с анализом внутригодовой динамики уровней был выполнен анализ внутригодового хода сопутствующих метеоэлементов – осадков и температуры воздуха (рис. 21).

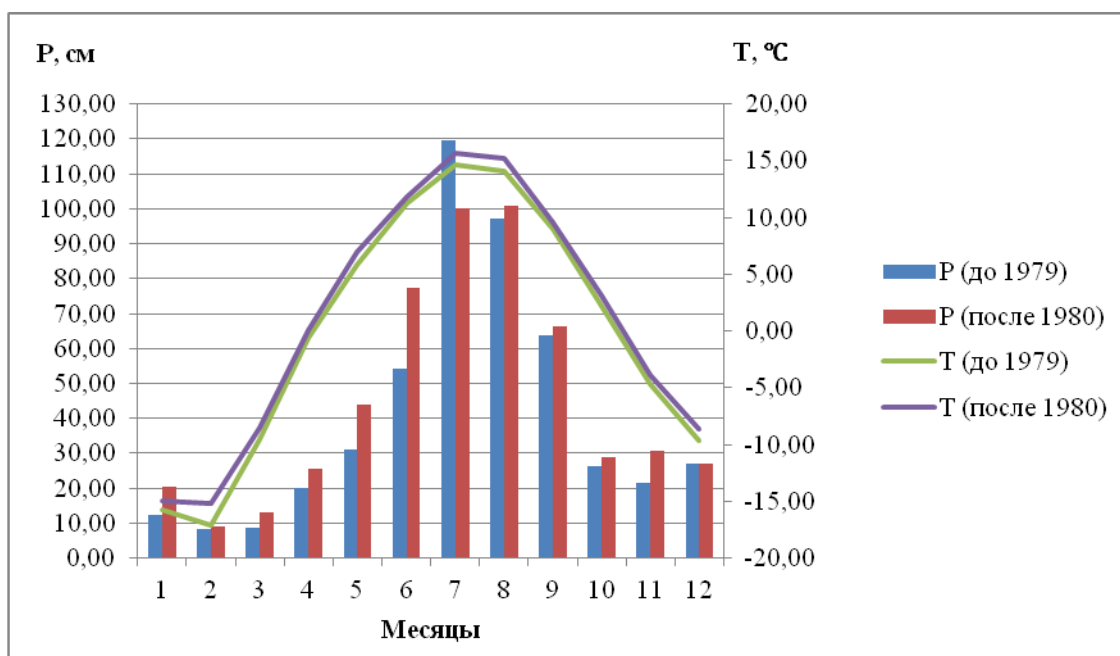


Рис. 21. Графики среднемноголетних месячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Бабушкин).

Наименьшее количество осадков выпадает в феврале – марте. Затем их количество возрастает, и максимальные значения приходятся на июль – август. Таким образом, большая часть осадков выпадает в летнее время, а наименьшая – зимой и в начале весны. Среднегодовое количество осадков, измеренных на метеостанции Бабушкин за первый период, составило 490 мм, а за второй - 543 мм. Среднемесячные значения осадков за второй период оказались большими, чем за первый (на 1-13 мм). Исключение составил июль, когда количество осадков уменьшилось на 20 мм.

Следует отметить, что внутригодовой ход осадков четко коррелируется с характером внутригодового хода уровня воды оз. Байкал со сдвижкой во времени. Так, максимальные уровни оз. Байкал отмечаются в сентябре-октябре, - на два месяца позже, чем наблюдается максимальное количество осадков. То же и с минимальными уровнями, наблюдаемыми в апреле-мае, тогда как минимальное количество осадков выпадает в феврале-марте. Снижение уровней воды при одновременном возрастании количества осадков объясняются тем, что данные об осадках на метеостанции Бабушкин не отражают ситуацию на всем водосборе озера, большая часть которого расположена южнее самого водоема и данной метеостанции.

Внутригодовой ход температуры воздуха хорошо коррелируется с ходом осадков.

На рисунке 22 представлен график среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Балхаш за два периода 1960-1979 и 1980-2016 гг.

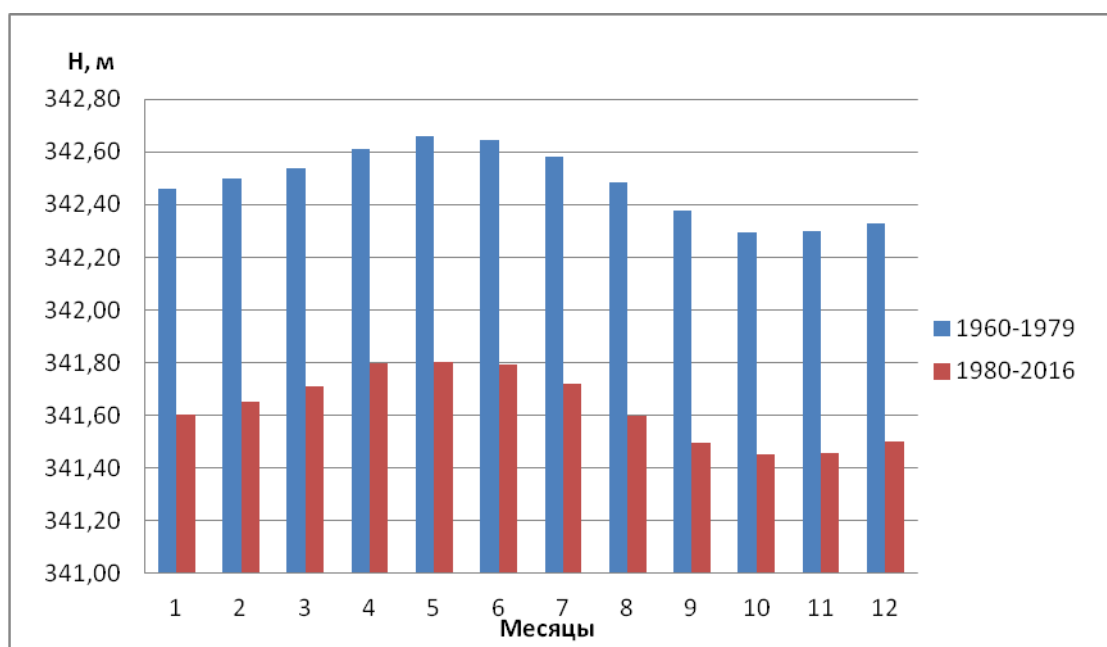


Рис. 22. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Балхаш (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Наибольшие значения уровней воды оз. Балхаш наблюдаются в весенний период (максимальные – в мае); далее происходит их постепенное снижение и к октябрю уровень достигает своих минимальных значений. Этот режим характерен для обоих периодов 1960-1979 и 1980-2016 гг. При этом во втором периоде произошло резкое снижение уровней воды во все месяцы примерно на 0,8 м. В отдельные годы наблюдались нарушения типового внутригодового режима уровней воды. Так, в 1960, 1964, 1969, 1988, 2016 годах наименьшие значения уровней воды были зафиксированы в весенний период, а наибольшие – в летне-осенний. 1987 год характеризуется резким подъемом и резким спадом уровня, причем весенние и осенние значения примерно одинаковы. В 1999 году максимальный уровень зафиксирован в мае, что характерно для режима оз. Балхаш, однако в августе произошел резкий подъем уровня. Начиная с 2012 года гидрографы изменяют свою форму с волнообразных на неровные с острыми вершинами.

Внутригодовой ход сопутствующих метеоэлементов – осадков и температуры воздуха представлен на рис. 23.

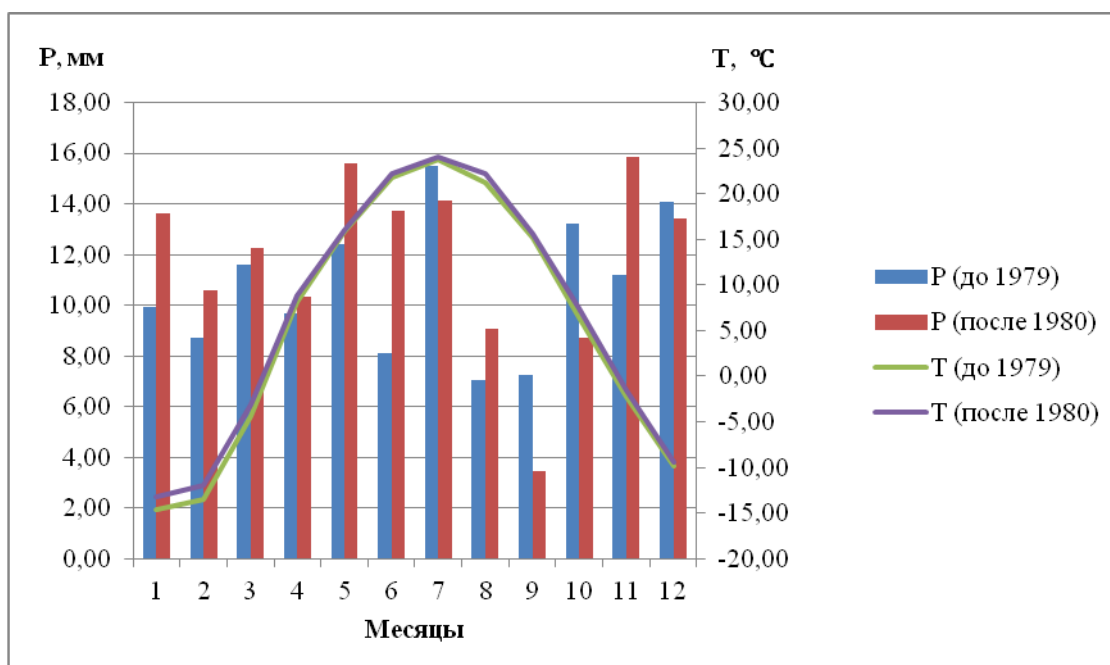


Рис. 23. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Балхаш).

Распределение осадков в течение года на м. ст. Балхаш не имеет выраженных закономерностей. Так, в период 1960-1979 гг. наименьшее их количество приходилось на июнь, август и сентябрь, а наибольшее – на июль, декабрь и октябрь. В 1980-2016 гг. наименьшее количество осадков приходилось на август, сентябрь и октябрь, а наибольшее - на ноябрь, май, и январь. Во второй период увеличилось как количество годовых осадков, так и осадков за большинство месяцев. Снижение осадков произошло только в сентябре и октябре. Внутригодовой ход осадков слабо коррелирует с ходом уровней воды, поскольку пополнение озера осуществляется преимущественно за счет грунтовых вод и вод реки Или, имеющей ледниковое питание. Однако, в отдельные периоды режим озера Балхаш зависит и от хода осадков. Так, весенний подъем уровня обусловлен стаиванием накопленных в осенне-зимние месяцы осадков. Снижение уровня осенью происходит в условиях малого количества осадков и температурах более  $+20^{\circ}\text{C}$ . Дополнительное питание водоем получает при таянии ледников в теплый период, поэтому спад уровня осенью плавный.

Для метеостанции Балхаш характерны значительные перепады температур в течение года. Так, в январе они могут опускаться до  $-15^{\circ}$ , а в июле достигать  $+24^{\circ}$ . Различия в среднемесячных значениях температуры воздуха за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. проявляются только в январе-феврале и в августе. В среднем, за второй период температура увеличилась почти на  $1^{\circ}$ .

На рисунке 24 представлен график среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Иссык-Куль за два периода 1960-1979 и 1980-2012 гг.

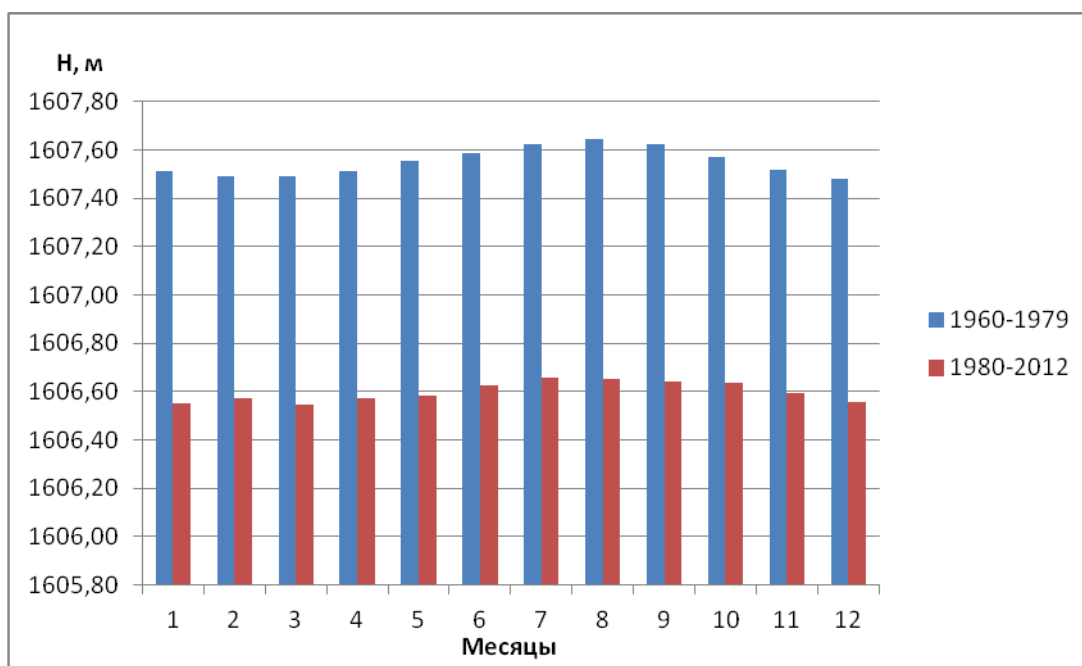


Рис. 24. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Иссык-Куль (за периоды 1960-1979 и 1980-2012 гг.)

Внутригодовой режим оз. Иссык-Куль характеризуется растянутым весенне-летним половодьем. Подъем уровня начинается в апреле, что вызвано поступлением воды с тающих ледников. К осени ледники прекращают таять, уровень воды в озере опускается и далее почти не меняется. В период 1960-1979 гг. максимальные значения наблюдались в августе, и минимальные – в марте. В период 1980-2012 гг. максимальные значения сместились на июль. Амплитуда колебаний уменьшилась с 0,15 до 0,10 м. Малые значения амплитуды связаны с незначительными внутригодовыми изменениями основного приходного компонента баланса - притока в озеро. Внутригодовой ход уровней за отдельные годы соответствует типовому ходу уровней на протяжении всего периода 1960-2012 гг. за исключением некоторых лет. Так, в апреле 1971 г. был зафиксирован высокий уровень воды. В периоды 1976-78 гг., 1991-1996 гг. и 2007-2010 гг. формы гидрографов отличны от типовых, из-за смещения минимальных значений на зимние месяцы.

Внутригодовой режим температуры воздуха и количества осадков проанализирован по данным метеостанции Чолпон-Ата (рис. 25).

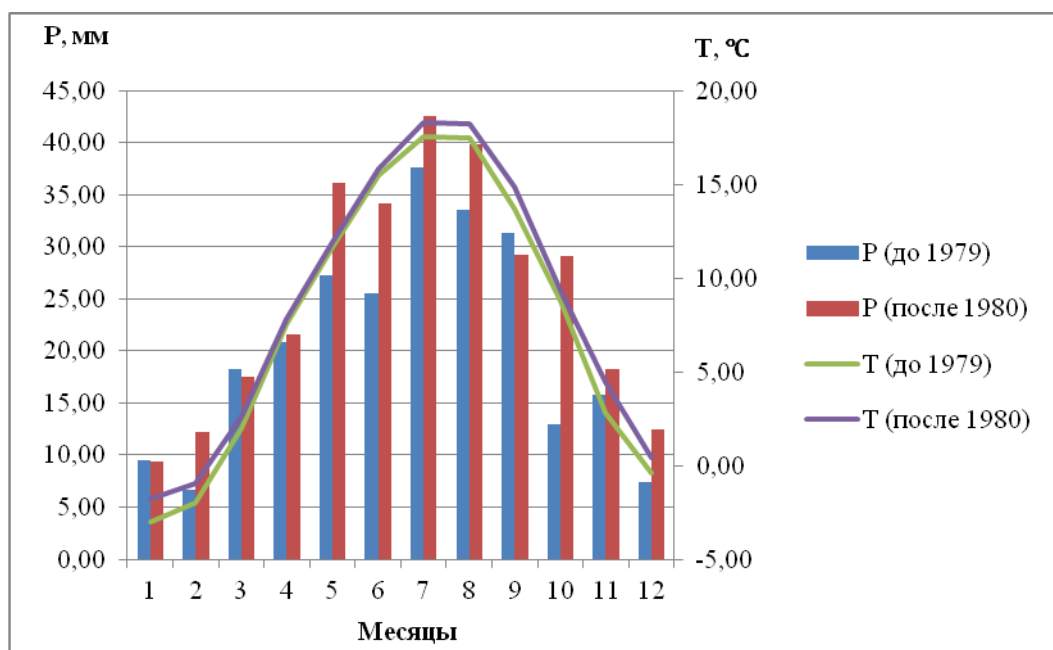


Рис. 25. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Чолпон-Ата)

Наибольшее количество осадков выпадает летом - в начале осени, наименьшее приходится на зимние месяцы. Суммарное количество осадков увеличилось с 247 мм в 1960-1979 гг. до 302 мм 1980-2012 гг. Среднее месячное количество осадков, за исключением января, марта и апреля, возросло, особенно в октябре.

Ход температуры воздуха коррелирует с ходом количества осадков. Среднемесячные температуры воздуха в период после 1980 года возросли примерно на 1°C, за исключением весенних месяцев - марта, апреля, мая.

Внутригодовой режим уровней коррелирует с внутригодовым ходом осадков и температуры воздуха. Однако при увеличивающемся количестве осадков и возрастающих температурах воздуха уровень воды озера снижается. Это объясняется тем, что оз. Иссык-Куль имеет преимущественно ледниковое питание, а данные о температуре воздуха по метеостанции Чолпон-Ата не отражают ситуацию в высокогорьях, где расположены ледники.

На рисунке 26 представлен график среднемесячных значений уровня воды оз. Ладжское за два периода 1960-1979 и 1980-2016 гг.



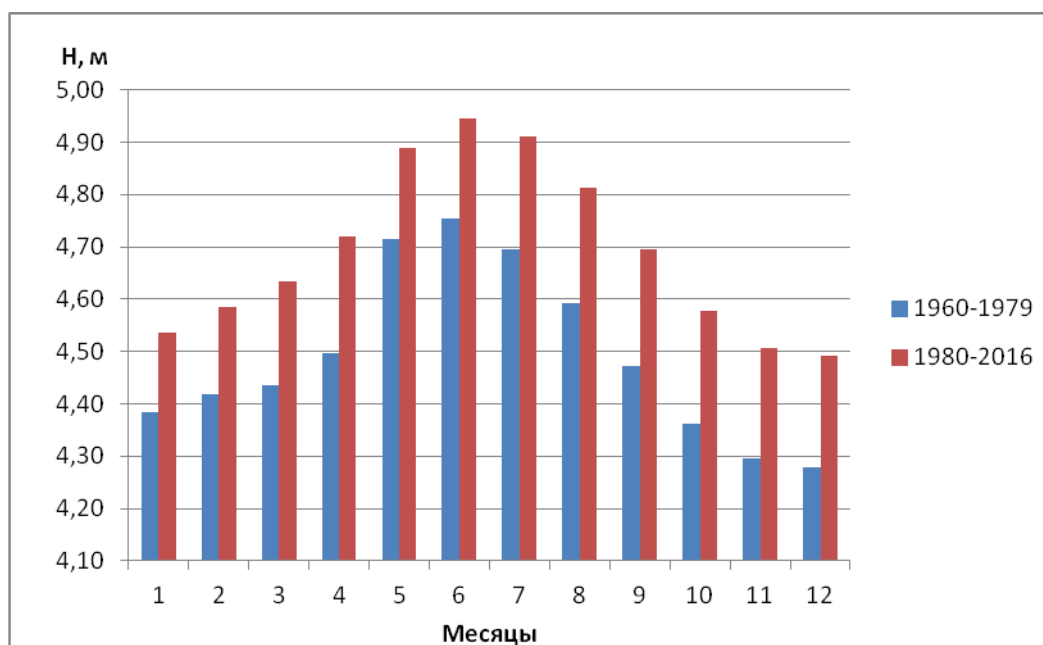


Рис. 26. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Ладожское (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Для Ладожского озера характерен следующий внутригодовой режим уровней воды: начиная с января, уровень воды растет, достигая максимальных значений в июне, а затем снижается, достигая минимума к декабрю. В период 1960-1979 гг. амплитуда внутригодовых колебаний составляла 0,53 м, однако в 1980-2016 гг. она уменьшилась до 0,46 м. При этом среднемесячные значения уровней после 1980 года возросли примерно на 0,20 м. Интересно, что внутригодовой режим уровней за отдельные годы не соответствует типовому режиму, за исключением периодов 1965-1973, 1976-1980, 1984-1995, 2000-2002, 2007-2008, 2011, 2015-2016 гг. В остальные годы колебания уровней воды оказываются растянутыми во времени и длятся от 2 до 4 лет. Это, вероятно, связано с неравномерным поступлением в Ладожское озеро стока рек Волхов, Вуокса и Свирь, зарегулированными плотинами ГЭС.

Внутригодовое распределение температур воздуха и количества осадков за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. представлено на рис. 27.

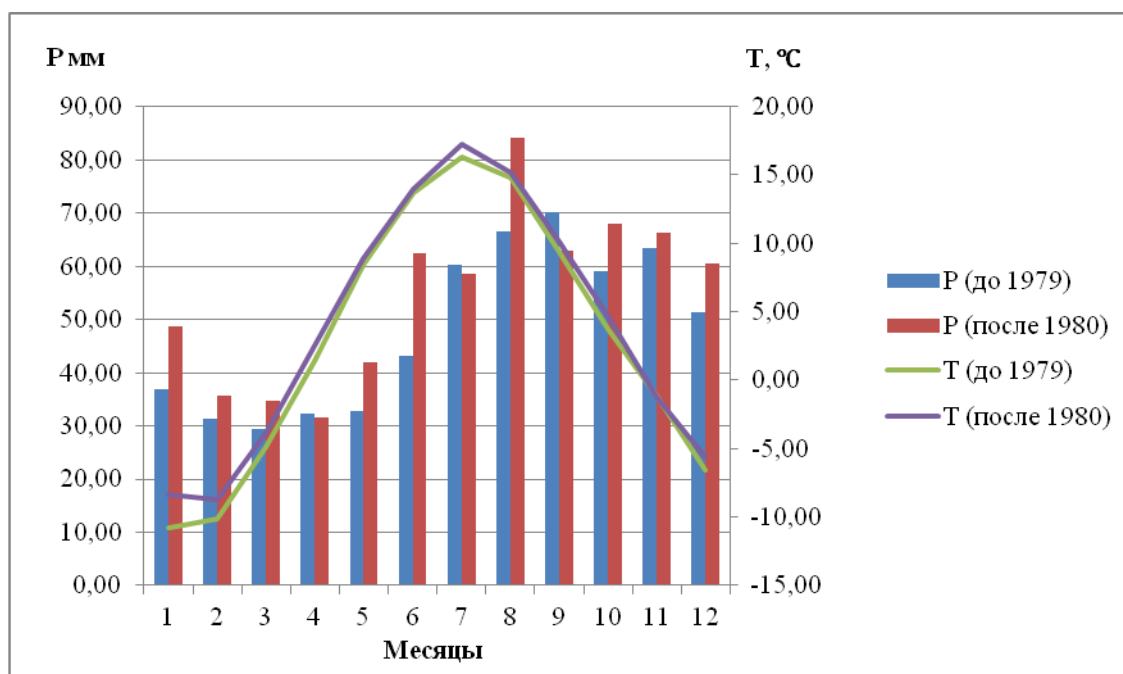


Рис. 27. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Сортавала)

С января по март количество осадков невелико; затем оно постепенно увеличивается, и большая часть от годовой суммы выпадает в осенне-зимний период. В 1960-1979 гг. максимальное значение наблюдалось в сентябре, в 1980-2016 гг. – в августе. Среднемесячные значения в период после 1980 года возросли, за исключением апреля, июля и сентября. В эти месяцы количество осадков несколько уменьшилось. Суммарное количество осадков за год увеличилось от 576 до 655 мм.

Ход осадков не коррелирует с ходом уровня воды: весенний подъем уровня заканчивается в июне, когда количество осадков только начинает возрастать. Это не удивительно, так как питание Ладожского озера осуществляется за счет весеннего снеготаяния, т.е. осадков, выпавших в осенне-зимний период, и притока речных вод.

Температура воздуха плавно возрастает с конца зимы до середины лета, достигая максимальных значений в июле, а затем постепенно убывает. Ход температур не коррелирует с ходом осадков и уровнем воды озер. Разница между среднемесячными значениями за периоды до и после 1980 года наиболее заметна в летние и зимние месяцы и не превышает 3 °С.

На рисунке 28 представлен график среднемесячных значений уровня воды оз. Онежское за два периода 1960-1979 и 1980-2016 гг.

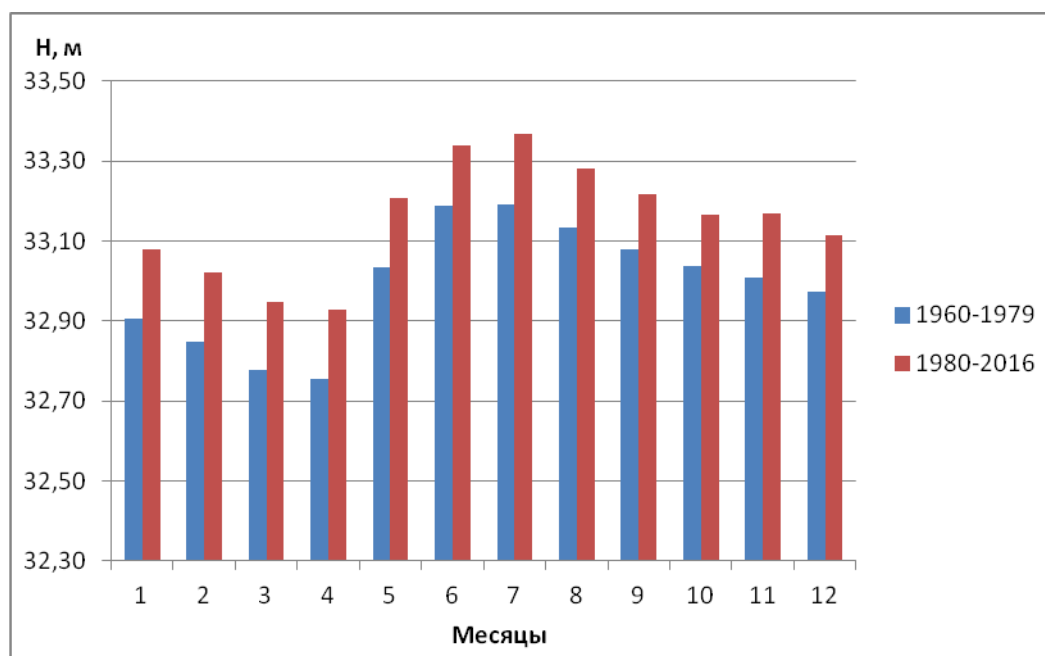


Рис. 28. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Онежское (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Внутригодовой режим Онежского озера характеризуется резким подъемом уровня воды в весенний период и последующим медленным снижением в течение всей последующей части года. Такой уровенный режим связан с регулированием Онежского озера плотиной Верхне-Свирской ГЭС, созданной в 1952 г.: в весенний период происходит накопление воды, которая затем расходуется в течение всего года. Минимальные уровни приходятся на апрель, максимальные – на июль. Амплитуда колебаний до и после 1980 года почти не изменилась и составила 0,43 м и 0,44 м соответственно, в то время как среднемноголетние месячные значения возросли на 0,20 м. Анализ внутригодового режима уровней за отдельные годы выявил его несоответствие типовому ходу уровней в некоторых случаях. Так, в 1961 году произошел резкий подъем уровня на 1 метр, причем максимальное значение наблюдалось в сентябре. В 1966, 1971, 1994, 1998, 2001, 2010, 2011 годах на гидрографах присутствует два пика – весенний и осенний, а в 1969, 1972, 1977, 1978, 1983, 1984, 2003, 2006, 2008 гг. происходит нехарактерное для типового хода уровней возрастание в ноябре-декабре. Также есть две пары лет (2008-2009, 1981-1982 гг.), когда в течение первого года происходит возрастание уровня, а в течение второго – его снижение.

Внутригодовой ход количества осадков и температуры воздуха на метеостанции Петрозаводск представлен на рис. 29.

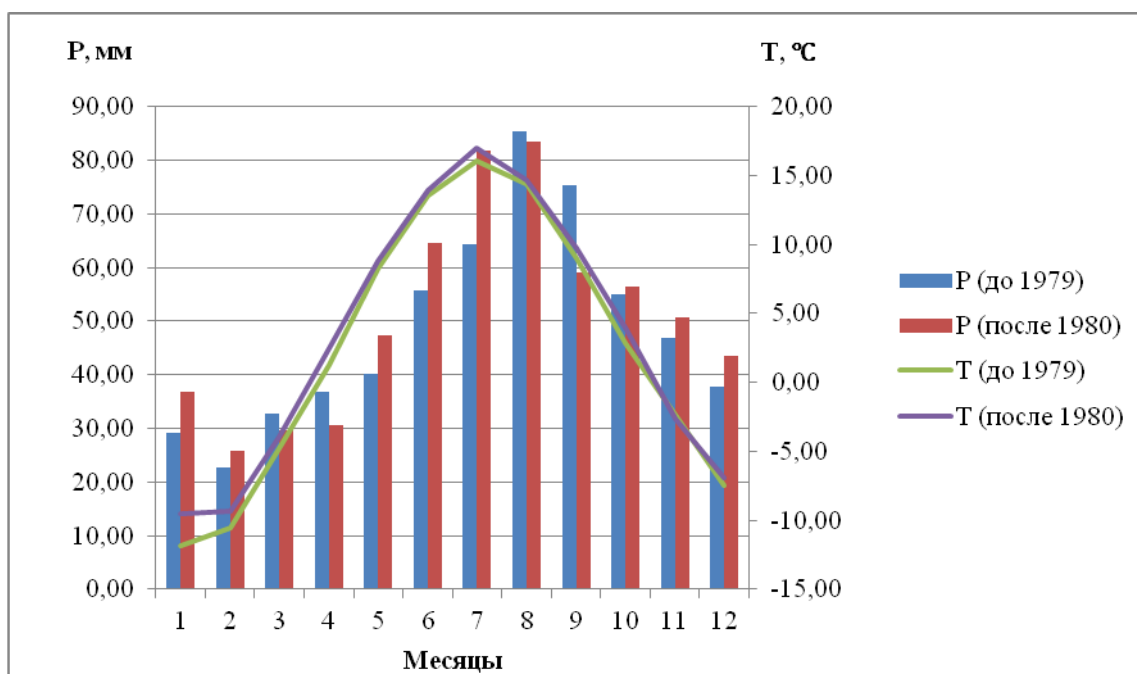


Рис. 29. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Петрозаводск)

Начиная с конца зимы, количество осадков постепенно увеличивается, достигая к концу лета – началу осени своих максимальных значений, после чего постепенно уменьшается. После 1980 г. период наступления максимальных значений сместился с августа-сентября на июль-август. Также увеличились среднемесячные значения количества осадков, а суммарное количество осадков за год увеличилось с 582 до 610 мм.

Ход уровня не коррелирует с ходом осадков, что объясняется регулированием внутригодового уровня Онежского озера плотиной Верхне-Свирской ГЭС. В то же время ход температур воздуха коррелирует с ходом осадков. В период 1980-2016 гг. среднемесячные значения температур возросли примерно на 0,5 – 1,0°C

На рисунке 30 представлен график среднемесячных значений уровня воды оз. Верхнее за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.

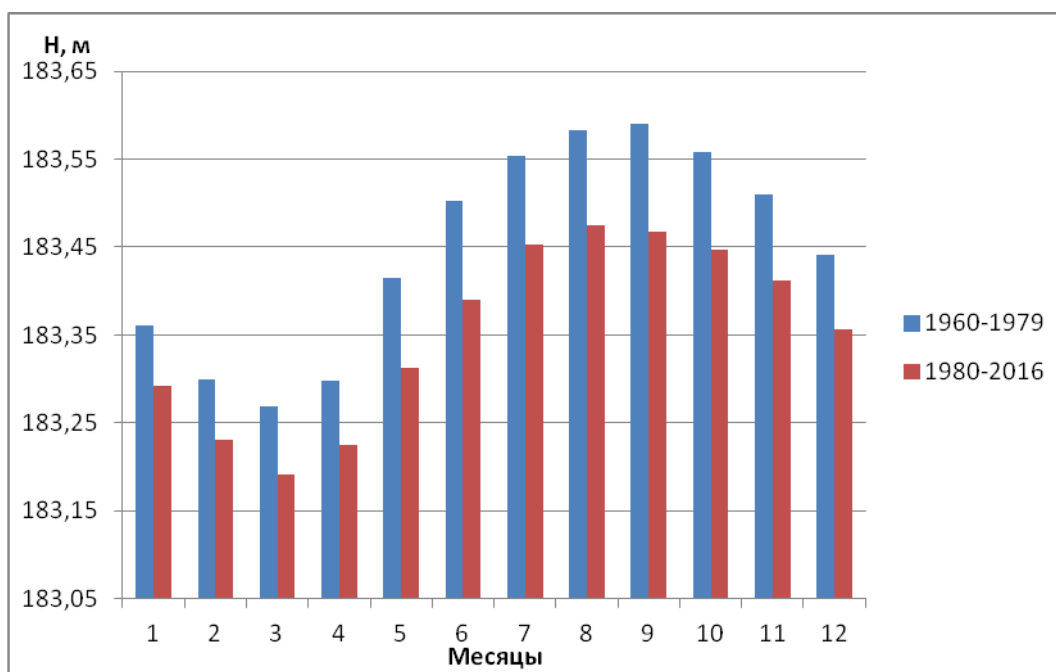


Рис. 30. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Верхнее (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Наименьшие значения уровня воды наблюдаются в весенний период (в марте), затем уровень повышается и к концу лета – началу осени достигает своих наибольших значений. В 1960-1979 гг. максимальные отметки уровней отмечались в сентябре, однако в 1980-2016 гг. время их наступления сместилось на август. Амплитуда колебаний уровней возросла с 0,22 м до 0,28 м, в то время как значения среднемноголетних месячных уровней по сравнению с первым периодом снизились на 0,10-0,12 м. Внутригодовой режим уровней почти не изменяется год от года и соответствует типовому ходу уровня за исключением нескольких лет - 1977, 1982, 1988, 2007, 2015 гг., - когда происходит смещение времени наступления максимальных и минимальных значений. Также в некоторые годы на гидрографе присутствует второй пик в осеннее время.

Внутригодовой ход температур воздуха и количества осадков за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. представлен на рисунке 31.

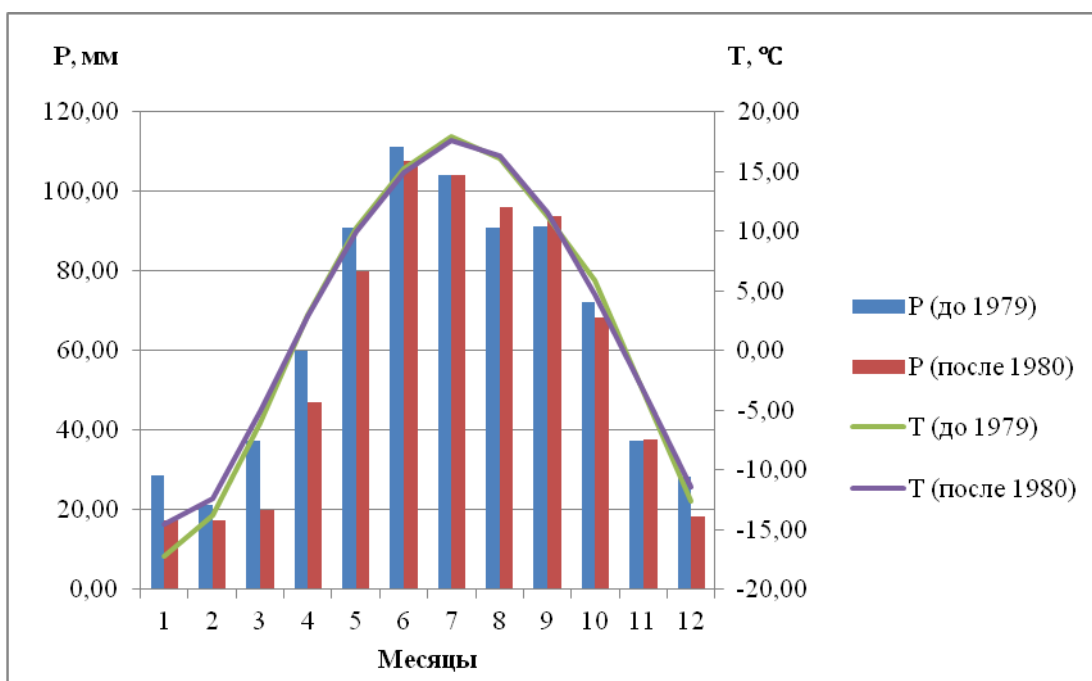


Рис. 31. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Тауэр-2С)

На метеостанции Тауэр-2С наибольшее количество осадков зафиксировано в летне-осенний период (максимум - в июне), а наименьшее – в зимний период (минимум - в феврале). Среднемесячные значения осадков в период после 1980 г. уменьшились, особенно в зимние и весенние месяцы. При этом среднемесячное годовое количество осадков на метеостанции уменьшилось с 773 до 709 мм.

Внутригодовой ход количества осадков коррелирует с ходом уровней воды с задержкой на 2 месяца. Уменьшение количества осадков в 1980-2016 гг. объясняет снижение среднемесячных значений уровней воды в этот же период.

Ход температур воздуха повторяет ход количества осадков. Внутригодовое распределение температур и среднемесячные значения за оба периода не изменились, лишь средние многолетние температуры января увеличились на 5°C.

На рисунке 32 представлен график среднемесячных значений уровня воды оз. Онтарио за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.

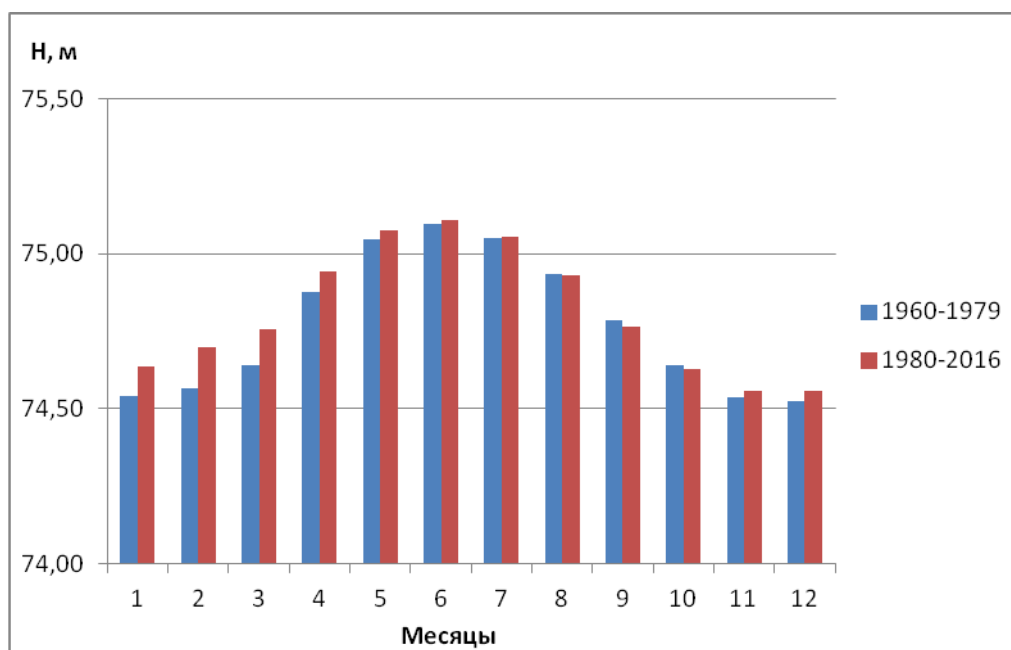


Рис. 32. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Онтарио (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Для внутригодового хода уровней воды озера Онтарио характерен подъем уровня в весенний период и, затем, постепенное снижение вплоть до конца осени. Максимальные значения наблюдаются в июне, а минимальные – в декабре. Среднемесячные значения уровня воды в период 1980-2016 гг. возросли, за исключением августа, сентября и октября. В эти месяцы уровни воды незначительно снизились. Амплитуда колебаний за периоды до и после 1980 года одинакова и составляет 0,55 м.

Внутригодовой режим год от года почти не изменяется и соответствует типовому ходу уровня за исключением нескольких лет, когда были зафиксированы нехарактерные для данного озера кратковременные подъемы воды. Так, в 1965-1969 гг. они происходили в зимний период, в 1977 году – в осенний период, а в 2006-2007 гг. - в весенний период.

Внутригодовое распределение температур воздуха и количества осадков представлено на рис. 33.

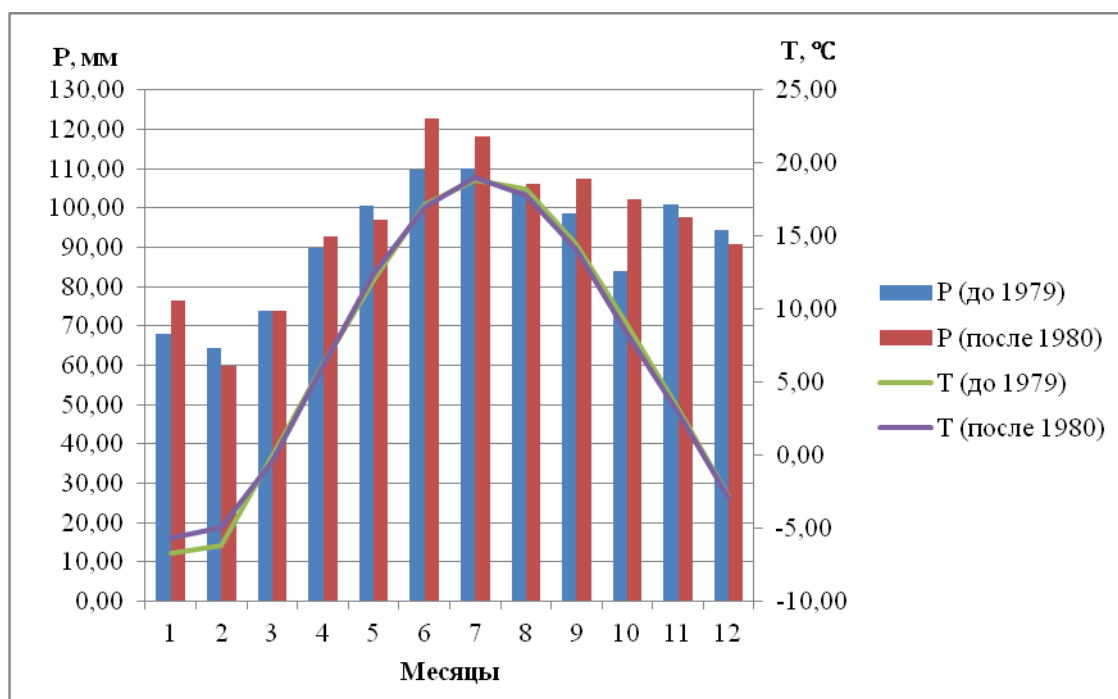


Рис. 33. График среднегодовых месячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Элледжани Стейт Парк)

Большая часть осадков выпадает в летне-осеннее время. Максимальное значение приходится на июнь, минимум отмечается в феврале. Среднегодовое количество осадков в период после 1980 года увеличилось с 728 до 836 мм, при этом среднемесячные значения за все месяцы возросли, за исключением февраля, мая и ноября.

Внутригодовой ход количества осадков коррелирует с ходом уровней воды. Возрастание количества осадков в период 1980-2016 гг. объясняет произошедшее в то же время увеличение среднемесячных значений уровней воды.

Ход температур воздуха повторяет ход количества осадков. Температуры положительны большую часть года, и принимают отрицательные значения только зимой. Внутригодовое распределение температур и среднемесячные значения за оба периода не изменились. Аналогично рассмотренной выше метеостанции Тауэр-2С, средние многолетние температуры января повысились на 5°C.

На рисунке 34 представлен график среднегодовых месячных значений уровня воды оз. Эри за два периода 1960-1979 и 1980-2016 гг.



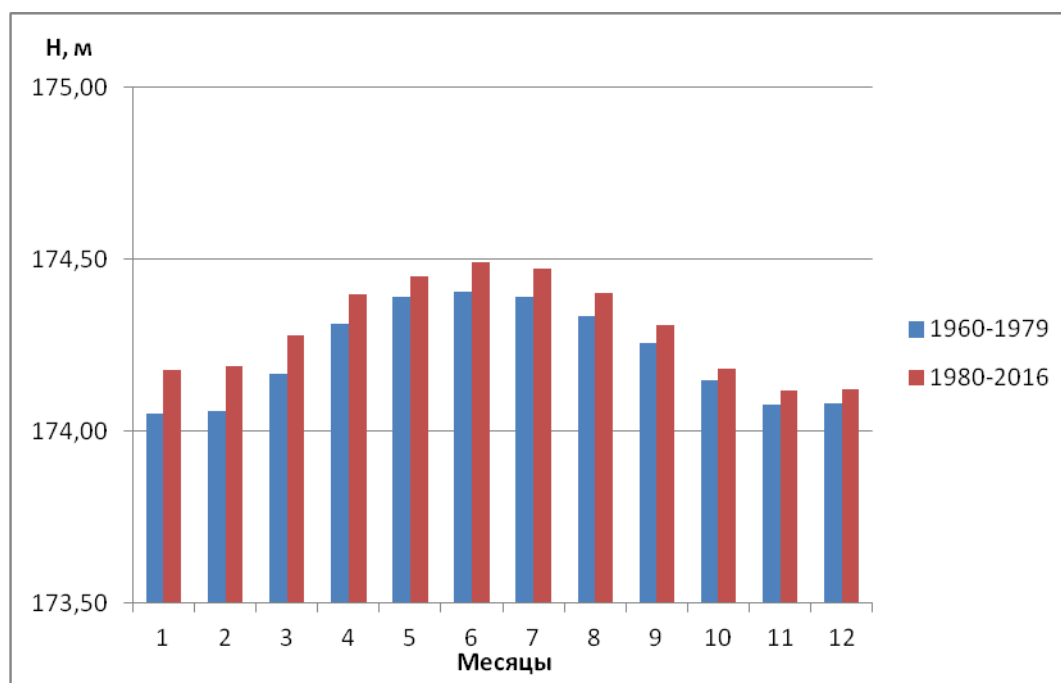


Рис. 34. График среднемноголетних месячных значений уровня воды оз. Эри (за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг.)

Внутригодовой режим озера Эри характеризуется повышением уровней воды в весенний период и снижением в летне-осенний период. Среднемесячные значения в период после 1980 года возросли примерно на 0,07 м по сравнению с 1960-1979 гг. В то же время амплитуда колебаний незначительно увеличилась с 0,35 до 0,37 м, а время наступления минимальных значений сместилось с февраля на ноябрь. На протяжении всего рассматриваемого периода 1960-2016 гг. внутригодовой режим не соответствовал типовому лишь в 1986-1987 гг.: весенний подъем воды не выражен из-за значительного снижения уровней на протяжении этих двух лет.

Внутригодовой ход количества осадков и температуры воздуха представлен на рис. 35.

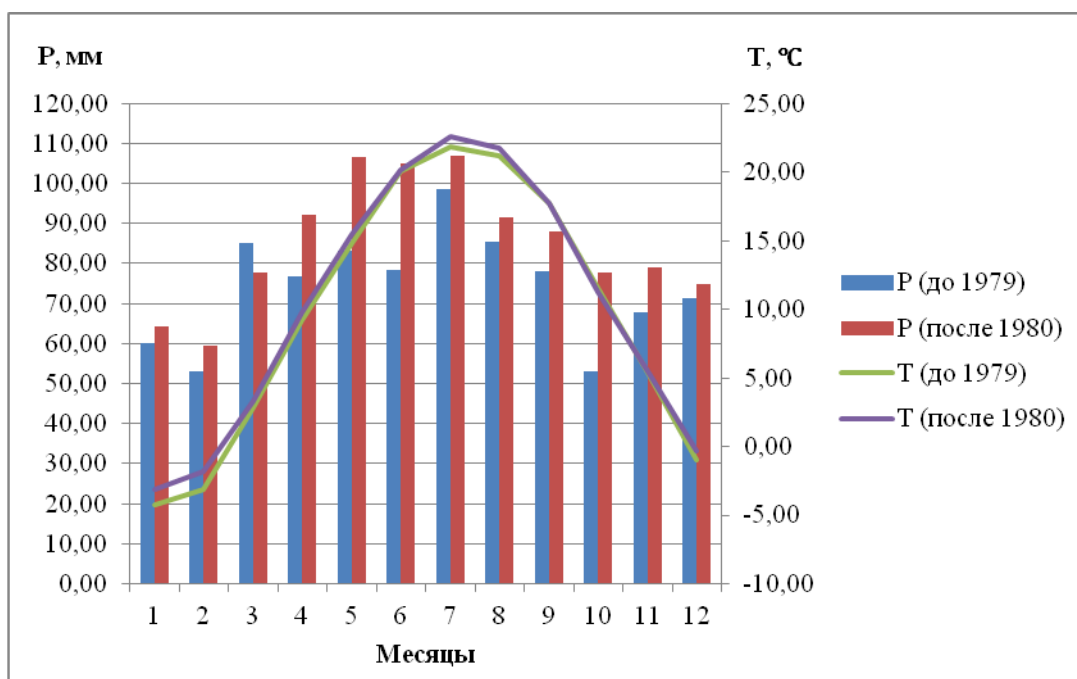


Рис. 35. График среднемесячных значений осадков и температуры воздуха (метеостанция Экрон Кентон Эйрпорт)

Большая часть годовых осадков приходится на летний период, меньшая – на зимнее время. В период после 1980 года внутригодовое распределение осадков становится более равномерным, в том числе летний максимум становится более выраженным. Одновременно с этим возрастает среднегодовое суммарное количество осадков: за период 1960-1979 гг. оно составило 891 мм, а за период 1980-2016 гг. – 1023 мм.

При анализе графиков 5.15 – 5.16 хорошо видна корреляция внутригодового хода количества осадков с ходом уровней воды. Увеличение среднемесячных значений уровня воды озера Эри в период 1980-2016 гг. вызвано увеличением количества осадков в тот же период.

Температура воздуха плавно возрастает с конца зимы до середины лета, достигая максимальных значений в июле, а затем постепенно убывает. Внутригодовое распределение температур за периоды до и после 1980 года не изменилось. При этом среднемесячные значения температуры воздуха за зимние и летние месяцы повысились на 1°C.

На основании проведенного анализа приходим к следующим выводам:

1. Для всех рассмотренных озер характер внутригодового режима среднемесячных уровней воды за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. остался неизменным. В то же время за отдельные месяцы наблюдаются изменения уровней в

диапазоне от нескольких сантиметров до 1 м. На озерах Байкал, Ладожское, Онежское, Эри во второй период уровни возросли за все месяцы, а на озерах Балхаш, Иссык-Куль, Верхнее - упали. На оз. Онтарио среднемесячные значения уровней воды увеличились, за исключением периода с августа по октябрь – в эти месяцы уровни незначительно снизились.

2. За большинство конкретных лет внутригодовой режим уровней воды озер соответствовал среднему многолетнему. Только для Ладожского озера выявлены многочисленные нарушения типового режима уровня (дополнительные внутригодовые подъемы уровня, колебания длительностью от 2 до 4 лет, смещение времени наступления максимальных и минимальных значений).

3. Внутригодовое распределение осадков за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. не изменилось, за исключением метеостанции Балхаш, где произошло смещение максимальных значений с июля на ноябрь. Суммарное количество осадков за год в период после 1980 г. возросло на всех станциях, за исключением метеостанции Тауэр-2С (оз. Верхнее).

4. Среднемесячные значения температуры воздуха в период после 1980 года возросли на  $0,1 - 1,3^{\circ}\text{C}$ , что прослеживается на всех метеостанциях. Особенно заметны эти изменения для летних и зимних месяцев.

5. Для большинства рассмотренных озер можно отметить наличие соответствия между внутригодовым ходом уровней воды и внутригодовым изменением количества осадков. Лучше всего оно выражено для Великих Американских озер и оз. Байкал. Это связано с тем, что осадки играют определяющую роль в водном балансе вышеуказанных озер. Для Онежского озера эта связь затухает регулирующим влиянием Верхне-Свирской ГЭС. Слабо связан с осадками ход уровня воды озер Балхаш и Иссык-Куль, которые получают основное питание из зоны формирования стока, расположенной в горах. Ход уровней воды Ладожского озера также не имеет тесной связи с ходом осадков на метеостанции Сортавала, т.к. последняя не может характеризовать характер увлажнения огромного бассейна Ладожского озера.

## 6. Оценка многолетних изменений уровней воды озер

### 6.1 Оценка однородности многолетних рядов уровня воды

Оценка однородности многолетних рядов уровней воды является одной из стандартных задач при анализе гидрометеорологической информации (Шелутко, 2007).

Неоднородность ряда данных может быть вызвана ошибками измерений или влиянием факторов, нарушающих естественный ход исследуемых характеристик во времени. В последнем случае это могут быть резкие климатические изменения или антропогенное воздействие, повлиявшие на ход уровня.

Оценка однородности многолетних рядов уровней воды (табл. 5) выполнена с помощью критерия Стьюдента (Шелутко, 2007).

Таблица 5

Результаты оценки однородности многолетних рядов (1960-2016 гг.) уровней воды по критерию Стьюдента

Озеро	Пост	$t_{\text{эмп}}$	df (число степеней свободы)	$t_{\text{табл}}$ при ( $\alpha=0,05$ )	$t_{\text{табл}}$ при ( $\alpha=0,01$ )	Вывод об однородности выборки	
						При ( $\alpha=0,05$ )	При ( $\alpha=0,01$ )
1	2	3	4	5	6	7	8
Байкал (до 2015г.)		0,86	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	г. Бабушкин (до 2015г.)	1,03	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	гм. ст. Томпа (до 2015г.)	0,91	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	гм. ст. Узур (до 2015г.)	1,51	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	пгт Танхой (до 2015г.)	1,62	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	Песчаная Бухта (до 2015г.)	0,79	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
	р.п. Байкал (до 2015г.)	1,17	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна

(Продолжение таблицы 5)

1	2	3	4	5	6	7	8
	р.п. Нижнеангарс к (до 2015г.)	0,8	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
<b>Балхаш</b>		4,67	55	2,004	2,688	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	ж. д. ст. Мынарал	4,90	47	2,012	2,685	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	о. Алгазы (до 2014 г.)	4,37	49	2,01	2,680	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
<b>Верхнее</b>		2,23	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	Однородна
	Дулут	0,48	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	Пойнт Ирокез	2,62	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	Однородна
<b>Иссык-Куль</b>		11,37	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	г. Балыкчи (г. Рыбачье)	11,42	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	г. Чолпон- Ата	11,43	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	с. Тамга	11,4	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
<b>Ладожское</b>		2	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	д. Сторожно	1,96	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	о. Валаам	1,98	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
<b>Онежское</b>		4,21	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	г. Кондопога	4,35	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	г. Медвежье- горск	3,76	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	г. Петрозаводск	4,52	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	д. Лонгасы	4,34	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
	пгт Вознесе- нье	4,6	57	2,002	2,665	<b>Неоднородна</b>	<b>Неоднородна</b>
<b>Онтарио</b>		0,91	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна

(Окончание таблицы 5)

1	2	3	4	5	6	7	8
	Кейп Винсент	0,98	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	Рочестер (до 2015г.)	0,88	56	2,003	2,667	Однородна	Однородна
<b>Эри</b>		1,02	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	Кливленд	1,1	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна
	Тоledo	1,3	57	2,002	2,665	Однородна	Однородна

Выборки для 4 озер (Байкал, Ладожское, Онтарио, Эри) оказались однородными, а для других 4 (Балхаш, Верхнее, Иссык-Куль, Онежское) – неоднородными.

Результаты подтверждаются на обоих уровнях значимости<sup>7,8</sup> ( $\alpha=0,05$ ,  $\alpha=0,01$ ) как для рядов уровней по водоему в целом, так и для рядов уровней по отдельным постам. Исключение составляют озеро Верхнее и его посты. Ряд по посту Дулут – однороден, тогда как ряды по водоему и по посту Пойнт Ирокез однородны при  $\alpha=0,05$ , но неоднородны при  $\alpha=0,01$ .

Неоднородность выборок свидетельствует о нарушении естественного хода уровней воды за выбранный период 1960-2016 гг. и, как уже указывалось выше, одним из повлиявших на ситуацию факторов могли быть изменившиеся климатические условия. Любопытно, что на каждом из 4<sup>х</sup> вышеуказанных водоемов эти изменения проявились в разной степени. Так, если для озер Балхаш и Онежское табличные значения критерия превышены в 2 раза, то в случае озера Иссык-Куль и его постов – почти в 6 раз.

## 6.2 Оценка значимости трендов в многолетних рядах уровня воды

Известно, что колебания уровней воды водоемов происходили всегда. Поэтому возникает вопрос о том, являются ли значимыми (т.е. нехарактерными, необычными) эти изменения для выбранного ряда данных.

<sup>7</sup> <http://matstats.ru/kt.html>

<sup>8</sup> <http://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica/>

Для ответа на поставленный вопрос используется стандартная процедура - проверка статистической значимости рядов (Шелутко, 2007). В данной работе она выполнена путем проверки гипотезы о равенстве нулю коэффициента регрессии с использованием t-критерия Стьюдента.

Принято два уровня значимости:  $\alpha = 0,05$  и  $\alpha = 0,01$ .

Результаты оценки значимости многолетних рядов уровня воды (наличия тренда) представлены в таблицах 6 – 8.

Таблица 6

Оценка значимости трендов в многолетних рядах уровня воды за 1960-1979 гг.

Озеро	Пост	$\alpha=0,05$			$\alpha=0,01$	
		$t_{\text{мп}}$	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда
1	2	3	4	5	6	7
Байкал (до 2015г.)		4,095	2,086	Значим	2,845	Значим
	г. Бабушкин (до 2015г.)	3,929	2,086	Значим	2,845	Значим
	гм. ст. Томпа (до 2015г.)	4,231	2,086	Значим	2,845	Значим
	гм. ст. Узур (до 2015г.)	4,928	2,086	Значим	2,845	Значим
	пгт Танхой (до 2015г.)	3,951	2,086	Значим	2,845	Значим
	Песчаная Бухта (до 2015г.)	4,046	2,086	Значим	2,845	Значим
	р.п. Байкал (до 2015г.)	3,899	2,086	Значим	2,845	Значим
	р.п. Нижнеангарск (до 2015г.)	3,946	2,086	Значим	2,845	Значим
Балхаш		7,625	2,093	Значим	2,845	Значим
	ж. д. ст. Мынарал	7,243	2,101	Значим	2,845	Значим
	о. Алгазы (до 2014 г.)	7,469	2,086	Значим	2,845	Значим

(Окончание таблицы 6)

1	2	3	4	5	6	7
<b>Верхнее</b>		3,346	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Дулут	4,042	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Пойнт Ирокез	3,286	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
<b>Иссык-Куль</b>		21,95	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	г. Балыкчи (г. Рыбачье)	21,276	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	г. Чолпон-Ата	22,157	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	с. Тамга	21,322	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
<b>Ладожское</b>		0,802	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	д. Сторожно	0,51	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	о. Валаам	0,88	2,086	Незначим	2,845	Незначим
<b>Онежское</b>		0,238	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	г. Кондопога	0,259	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	г. Медвежьегорск	0,121	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	г. Петрозаводск	0,181	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	д. Лонгасы	0,182	2,086	Незначим	2,845	Незначим
	пгт Вознесенье	0,312	2,086	Незначим	2,845	Незначим
<b>Онтарио</b>		3,396	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Кей Винсент	3,592	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Рочестер (до 2015г.)	3,405	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
<b>Эри</b>		4,719	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Кливленд	4,775	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>
	Тоledo	4,751	2,086	<b>Значим</b>	2,845	<b>Значим</b>



Оценка значимости трендов в многолетних рядах уровня воды за 1980-2016 гг.

Озеро	Пост	$\alpha=0,05$			$\alpha=0,01$	
		$t_{\text{эмп}}$	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда
1	2	3	4	5	6	7
<b>Байкал (до 2015г.)</b>		0,894	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	г. Бабушкин (до 2015г.)	0,856	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	гм. ст. Томпа (до 2015г.)	0,839	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	гм. ст. Узур (до 2015г.)	0,895	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	пгт Танхой (до 2015г.)	0,722	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	Песчаная Бухта (до 2015г.)	1,013	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	р.п. Байкал (до 2015г.)	1,14	2,028	Незначим	2,719	Незначим
	р.п. Нижнеангарск (до 2015г.)	1,087	2,028	Незначим	2,719	Незначим
<b>Балхаш</b>		8,790	2,045	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
	ж. д. ст. Мынарал	7,869	2,045	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
	о. Алгазы (до 2014 г.)	7,489	2,045	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
<b>Верхнее</b>		3,222	2,026	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
	Дулут	1,964	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	Пойнт Ирокез	3,803	2,026	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
<b>Иссык-Куль</b>		2,246	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	г. Балыкчи (г. Рыбачье)	2,678	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	г. Чолпон-Ата	2,335	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	с. Тамга	2,588	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим

(Окончание таблицы 7)

1	2	3	4	5	6	7
<b>Ладожское</b>		1,85	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	д. Сторожно	2,12	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	о. Валаам	1,982	2,026	Незначим	2,719	Незначим
<b>Онежское</b>		2,196	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	г. Кондопога	1,577	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	г. Медвежьегорск	2,12	2,026	<b>Значим</b>	2,719	Незначим
	г. Петрозаводск	1,605	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	д. Лонгасы	1,615	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	пгт Вознесенье	1,156	2,026	Незначим	2,719	Незначим
<b>Онтарио</b>		1,835	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	Кей Винсент	1,984	2,026	Незначим	2,719	Незначим
	Рочестер (до 2015г.)	1,855	2,028	Незначим	2,719	Незначим
<b>Эри</b>		4,614	2,026	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
	Кливленд	4,263	2,026	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>
	Тоledo	4,086	2,026	<b>Значим</b>	2,719	<b>Значим</b>

Оценка значимости трендов в многолетних рядах уровня воды за 1960-2016 гг.

Озеро	Пост	$\alpha=0,05$			$\alpha=0,01$	
		$t_{\text{эмп}}$	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда	$t_{\text{табл}}$	Вывод о значимости тренда
1	2	3	4	5	6	7
Байкал (до 2015г.)		0,507	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	г. Бабушкин (до 2015г.)	0,659	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	гм. ст. Томпа (до 2015г.)	0,518	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	гм. ст. Узур (до 2015г.)	1,004	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	пгт Танхой (до 2015г.)	0,613	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	Песчаная Бухта (до 2015г.)	0,508	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	р.п. Байкал (до 2015г.)	0,922	2,003	Незначим	2,667	Незначим
	р.п. Нижнеангарск (до 2015г.)	0,55	2,003	Незначим	2,667	Незначим
Балхаш		1,337	2,011	Незначим	2,667	Незначим
	ж. д. ст. Мынарал	1,274	2,012	Незначим	2,667	Незначим
	о. Алгазы (до 2014 г.)	1,940	2,01	Незначим	2,667	Незначим
Верхнее		3,314	2,002	Значим	2,667	Значим
	Дулут	1,029	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	Пойнт Ирокез	3,966	2,002	Значим	2,667	Значим
Иссык-Куль		7,744	2,002	Значим	2,667	Значим
	г. Балыкчи (г. Рыбачье)	7,491	2,002	Значим	2,667	Значим
	г. Чолпон-Ата	7,702	2,002	Значим	2,667	Значим
	с. Тамга	7,579	2,002	Значим	2,667	Значим

(Окончание таблицы 8)

1	2	3	4	5	6	7
<b>Ладожское</b>		0,539	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	д. Сторожно	0,418	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	о. Валаам	0,449	2,002	Незначим	2,667	Незначим
<b>Онежское</b>		2,291	2,002	<b>Значим</b>	2,667	Незначим
	г. Кондопога	2,668	2,002	<b>Значим</b>	2,667	Незначим
	г. Медвежьегорск	1,976	2,002	<b>Значим</b>	2,667	Незначим
	г. Петрозаводск	2,751	2,002	<b>Значим</b>	2,667	<b>Значим</b>
	д. Лонгасы	2,628	2,002	<b>Значим</b>	2,667	<b>Значим</b>
	пгт Вознесе-нье	3,057	2,002	<b>Значим</b>	2,667	<b>Значим</b>
<b>Онтарио</b>		0,91	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	Кей Винсент	0,851	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	Рочестер (до 2015г.)	0,914	2,003	Незначим	2,667	Незначим
<b>Эри</b>		0,016	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	Кливленд	0,175	2,002	Незначим	2,667	Незначим
	Толедо	0,394	2,002	Незначим	2,667	Незначим

Анализ полученных данных показал, что для трех рассмотренных периодов оценки сильно различаются.

При анализе многолетних рядов уровней воды за весь рассматриваемый период (1960-2016 гг.) значимые тренды установлены для озер Балхаш, Иссык-Куль, Онежское и Верхнее как в целом для водоемов, так и для большинства постов на них. Характерно, что многолетние ряды по этим же озерам не соответствовали гипотезе однородности (таблица 5).

При анализе многолетних рядов уровней воды за первый период (1960-1979 гг.) значимые тренды были установлены для большинства озер за исключением

Ладожского и Онежского. Это может свидетельствовать о том, что влияние климатических изменений на динамику уровней озер стало проявляться уже в начале 1960х годов.

При анализе многолетних рядов уровней воды за второй период (1980-2016 гг.) значимые тренды были установлены для шести озер и большинства постов на них (Балхаш, Эри, Верхнее, Ладожское, Онежское, Иссык-Куль). Для озер Байкал и Онтарио тренды оказались незначимыми. Напомним здесь, что для тех же озер за период 1960-1979 гг. были установлены значимые тренды.

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Для двух озер – Верхнее (кроме поста Дулут) и Иссык-Куль тренды в рядах уровней воды оказались значимыми для всех трех рассмотренных периодов. Эти же выборки были ранее оценены как неоднородные.
2. Для озер Ладожское и Онежское тренды в рядах уровней воды как за период 1960-1979 гг., так и за период 1980-2016 гг. оказались незначимыми (для  $\alpha = 0,01$ ).
3. Значимые тренды в рядах уровней воды за период 1960-1979 гг., установленные для большинства озер (кроме Ладожского и Онежского) могут свидетельствовать о том, что влияние климатических изменений на динамику уровней озер стало проявляться уже в начале 1960х годов.

### **6.3 Оценка количественных изменений уровней воды озер за период нестационарной климатической ситуации**

Количественные оценки изменений уровней воды озер за период 1980-2016 гг. были выполнены с использованием графических диаграмм, построенных для всех озер и постов на них по среднегодовым значениям. На диаграммы были нанесены линии тренда и с них были сняты значения, соответствующие последнему ( $h_{тр2}$ ) и первому ( $h_{тр1}$ ) году использованного ряда. Разность этих отметок характеризует общее изменение уровня за рассматриваемый период:

$$\Delta h_{тр} = h_{тр2} - h_{тр1}$$

Для того, чтобы уравнивать временные плоскости отсчета уровней за первый и второй периоды, была определена разность -  $\Delta$  между начальным значением  $h_{тр1}$ , снятым с линии тренда, и среднемноголетним значением уровня воды за первый период -  $H^1$ :

$$\Delta = h_{тр1} - H^1$$

Суммарные изменения уровня воды за период 1980-2016 гг. по сравнению с 1960-1979 гг. были рассчитаны, как:

$$\Sigma\Delta = \Delta + \Delta h_{\text{тр}}$$

Результаты полученных оценок представлены в таблице 9. В ней даны, как абсолютные значения изменений -  $\Sigma\Delta$  (см), так и удельные –  $\delta = \Sigma\Delta/n$  (см/год), где  $n=37$  – число лет во втором периоде.

Таблица 9

Изменения уровней воды озер за период 1980-2016 гг. по сравнению с предыдущим периодом

Озеро	Пост	$H_1$ (м)	$h_{\text{тр}1}$ (м)	$h_{\text{тр}2}$ (м)	$\Delta h_{\text{тр}}$ (см)	$\Delta$ (см)	$\Sigma\Delta$ (см)	$\delta$ (см/год)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Байкал (до 2015)</b>		455,3	455,30	455,43	13	0	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	г. Бабушкин (до 2015)	455,28	455,29	455,41	12	1	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	гм. ст. Томпа (до 2015)	455,28	455,27	455,41	14	-1	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	гм. ст. Узур (до 2015)	455,24	455,31	455,43	12	7	<b>19</b>	<b>0,51</b>
	пгт Танхой (до 2015)	455,3	455,33	455,43	10	3	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	Песчаная Бухта (до 2015)	455,32	455,25	455,39	14	-7	<b>7</b>	<b>0,19</b>
	р.п. Байкал (до 2015)	455,28	455,28	455,45	17	0	<b>17</b>	<b>0,46</b>
	р.п. Нижнеангарск (до 2015)	455,28	455,26	455,42	16	-2	<b>14</b>	<b>0,38</b>
<b>Балхаш</b>		342,47	340,8	342,53	173	-167	<b>6</b>	<b>0,16</b>
	ж.д.ст. Мынарал	342,46	340,83	342,43	160	-163	<b>-3</b>	<b>-0,08</b>
	о. Алгазы	342,49	340,76	342,47	171	-173	<b>-2</b>	<b>-0,05</b>

(Окончание таблицы 9)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Верхнее</b>		183,45	183,49	183,22	-27	4	<b>-23</b>	<b>-0,62</b>
	Дулут	183,4	183,46	183,29	-17	6	<b>-11</b>	<b>-0,30</b>
	Пойнт Ирокез	183,46	183,53	183,15	-38	7	<b>-31</b>	<b>-0,84</b>
<b>Иссык-Куль</b>		1607,55	1606,51	1606,76	25	-104	<b>-79</b>	<b>-2,14</b>
	г. Балыкчи (г. Рыбачье)	1607,60	1606,51	1606,80	29	-109	<b>-80</b>	<b>-2,16</b>
	г. Чолпон-Ата	1607,56	1606,51	1606,76	25	-105	<b>-80</b>	<b>-2,16</b>
	с. Тамга	1607,56	1606,51	1606,78	27	-105	<b>-78</b>	<b>-2,11</b>
<b>Ладожское</b>		4,49	4,88	4,51	-37	39	<b>2</b>	<b>0,05</b>
	д. Сторожно	4,51	4,93	4,50	-43	42	<b>-1</b>	<b>-0,03</b>
	о. Валаам	4,48	4,88	4,49	-39	40	<b>1</b>	<b>0,03</b>
<b>Онежское</b>		32,99	33,28	33,10	-18	29	<b>11</b>	<b>0,30</b>
	г. Кондопога	32,99	33,26	33,13	-13	27	<b>14</b>	<b>0,38</b>
	г. Медвежьегорск	33,00	33,25	33,08	-17	25	<b>8</b>	<b>0,22</b>
	г. Петрозаводск	33,00	33,26	33,13	-13	26	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	д. Лонгасы	33,00	33,26	33,13	-13	26	<b>13</b>	<b>0,35</b>
	пгт Вознесе-нье	33,00	33,24	33,16	-8	24	<b>16</b>	<b>0,43</b>
<b>Онтарио</b>		74,77	74,86	74,76	-10	9	<b>-1</b>	<b>-0,03</b>
	Кейп Винсент	74,71	74,83	74,74	-9	12	<b>3</b>	<b>0,08</b>
	Рочестер (до 2015)	74,77	74,86	74,76	-10	9	<b>-1</b>	<b>-0,03</b>
<b>Эри</b>		174,22	174,54	174,05	-49	32	<b>-17</b>	<b>-0,46</b>
	Кливленд	174,22	174,53	174,02	-51	31	<b>-20</b>	<b>-0,54</b>
	Тоledo	174,2	174,52	174,09	-43	32	<b>-11</b>	<b>-0,30</b>

Согласно данным, полученным на основании трендовых оценок, за период 1980-2016 гг. произошло увеличение среднегодовых уровней воды горных озер и снижение уровней равнинных. Так, на Байкале, Иссык-Куле и Балхаше, в питании которых принимают участие воды снежников и ледников, уровни возросли соответственно на 10-17, 25-29 и 160-173 см.

На озерах Северо-Запада России - Ладожском и Онежском, произошло снижение уровней, которое для Ладожского озера в целом составило около 37 см, а для Онежского – 18 см. Такая же ситуация отмечается и для всех рассмотренных североамериканских озер. Наибольшее снижение отмечено для оз. Эри (-43-51 см), далее следует оз. Верхнее (-17 - 38 см.) и, наконец, оз. Онтарио (-9-10 см).

Однако после уравнивания временных плоскостей отсчета уровней за первый и второй периоды, картина существенно изменилась. Итоговые количественные оценки изменений уровней воды рассматриваемых озер за период нестационарной климатической ситуации (1980-2016 гг.) по сравнению с предшествующим периодом позволили сделать следующие основные выводы.

Наибольшие изменения уровня воды произошли на оз. Иссык-Куль и составили -78 -80 см. Изменения уровня воды оз. Балхаш оказались незначительными и составили от -2 до +6 см. Здесь следует иметь ввиду, что в течение 1960-1979 гг. уровни озера Балхаш существенно снизились за счет наполнения Капчагайского водохранилища на р. Или. Поэтому, последующий рост уровней в течение 1980-2016 гг. по существу компенсировал произошедшее снижение в предыдущий период.

Для двух североамериканских озер отмечено общее снижение уровней. Так, для оз. Верхнее это снижение составило -11-31см. и для оз. Эри -11-20. Изменения уровней оз. Онтарио оказались незначительными и неоднозначными – от -1 до +3 см.

Уровни воды Онежского озера выросли на +8 +16 см., а для Ладожского озера изменения уровней оказались незначительными и неоднозначными от +2 до -1 см.

На оз. Байкал наблюдался рост уровней воды в диапазоне от +7 до +19 см.



## **Заключение**

1. Основной целью настоящей работы являлась оценка изменений уровня режима крупных озер мира в условиях нестационарной климатической ситуации последних десятилетий. В процессе выполнения работы был проведен анализ многолетней и внутригодовой динамики уровней этих озер в увязке с анализом изменений двух метеорологических элементов – осадков и температуры воздуха. Была, также, рассмотрена типовая структура воднобалансовых соотношений, характерных для рассматриваемых озер. Вышеуказанное позволило объяснить выявленные закономерности в многолетней динамике уровней озер и их изменениях в последние десятилетия. Выполненное исследование особенно актуально в контексте современной проблемы оценки влияния климатических изменений на природную среду и, в частности, на гидрологический режим крупных водоемов.

2. Исследование выполнено на обширных исходных материалах. В результате первичного анализа данных наблюдений за уровнем воды на 49 озерах и 168 постах, для использования в работе были отобраны и дополнены ряды среднегодовых и месячных значений по 8 крупным водоемам и 25 постам на них. Также были использованы ряды данных наблюдений за температурой воздуха и количеством осадков на 8 метеостанциях. Был принят единый расчетный период длительностью 57 лет - с 1960 по 2016 гг.

3. Методика оценки изменений уровней воды озер включала анализ однородности многолетних рядов наблюдений за уровнем воды и оценку значимости их трендовой составляющей с использованием статистических приемов. Изменения уровней воды оценивались за период 1980-2016 гг. (нестационарная климатическая ситуация) по сравнению с периодом 1960-1979 гг. Для объяснения и подтверждения выявленных изменений уровней воды рассмотренных озер были проанализированы хронологические графики и разностные интегральные кривые многолетнего хода уровней озер и двух климатических параметров – температуры воздуха и осадков.

4. Рассмотрена структура многолетнего водного баланса озер и количественные соотношения его основных составляющих. Показано, что структура водного баланса озера зависит от комплекса физико-географических условий водосбора и морфометрических характеристик самого водоема (объема, соотношения между площадью озера и площадью водосбора, проточности, климатических условий региона, типа формирования притока в водоем).

5. Анализ совмещенных хронологических графиков многолетних колебаний уровней воды, температур воздуха и количества осадков позволил выявить особенности динамики уровней воды различных озер и наличие взаимосвязи с динамикой метеоэлементов. Анализ разностных интегральных кривых позволил выделить циклы и фазы в многолетних колебаниях уровня воды, осадков и температуры воздуха. На всех озерах в пределах анализируемого периода (1960-2016 гг.) четко прослеживается один полный цикл колебаний уровней воды и сопутствующих метеоэлементов длительностью около 48 лет. Для большинства озер кривые хода метеоэлементов находятся в противофазе к ходу уровня воды.

6. Установлено, что характер внутригодового режима среднемесячных уровней воды озер и сопутствующих метеоэлементов за периоды 1960-1979 и 1980-2016 гг. остался неизменным. Однако, количественно на озерах Байкал, Ладожское, Онежское, Эри во второй период уровни возросли во все месяцы, а на озерах Балхаш, Иссык-Куль, Верхнее - упали. На оз. Онтарио среднемесячные значения уровней воды увеличились, за исключением периода с августа по октябрь – в эти месяцы уровни незначительно снизились. Среднегодовое количество осадков за период после 1980 г. возросло на всех станциях, за исключением метеостанции Тауэр-2С (оз. Верхнее). Среднемесячные значения температуры воздуха в период после 1980 года возросли на 0,1 – 1,3°C, что прослеживается на всех метеостанциях и особенно заметно для летних и зимних месяцев.

7. Проверка многолетних рядов уровней воды на однородность показала, что гипотезе однородности не соответствуют выборки для трех озер (Балхаш, Иссык-Куль и Верхнее) из восьми. Значимые тренды в рядах уровней воды за период 1960-1979 гг., установлены для большинства озер (кроме Ладожского и Онежского). Нарушение климатических условий в районах всех рассматриваемых озер подтверждается наличием значимых трендов в многолетней динамике температур воздуха и количества осадков на ближайших к водоемам метеостанциях.

8. Наибольшие количественные изменения уровня воды за период 1980-2016 гг. по сравнению с периодом 1960-1979 гг. произошли на оз. Иссык-Куль – снижение его уровня составило около -80 см. Падение уровня произошло и на двух североамериканских озерах - на оз. Верхнее оно составило -11-31см. и на оз. Эри -11-20. На оз. Байкал наблюдался рост уровней воды в диапазоне от +7 до +19 см. Также выросли уровни воды Онежского озера на +8 +16 см. Для остальных озер изменения уровня воды оказались несущественными (Балхаш, Ладожское, Эри).

9. Выявленные особенности и закономерности многолетней и внутригодовой динамики уровней воды рассмотренных озер и их взаимосвязь с динамикой метеоэлементов помогут расширить наши представления о влиянии изменений климата на водные объекты суши и явятся вкладом в дальнейших исследованиях по данной тематике.

## Список литературы

1. Богословский Б.Б. Озероведение. - Изд-во МГУ, 1960, 335 с.
2. Водные ресурсы России и их использование. Под ред. проф. И.А. Шикломанова. СПб: ГГИ, 2008, 600 с.
3. Водные ресурсы СССР и их использование. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 302 с.
4. Вуглинский В.С., Журавлев С.А., Трушевский В.Л. Методические указания к практикуму по воднобалансовым расчетам. СПб: Изд-во С.-Петербург. Ун-та. 2012, 60 с.
5. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л: Гидрометеиздат, 1974, 637 с.
6. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. М.: «Высшая школа», 1991, 368 с.
7. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата. Росгидромет. М., 2008, 227 с.
8. Попова В.П., Шиварева С.П., Домран А.О. Водный баланс озера Балхаш за период с 2000 по 2009 годы // Гидрометеорология и экология, 2010 г. № 4. С. 92-100.
9. Рекомендации по расчету «Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов», СПб, ФГБУ «ГГИ», 2017, 42 с.
10. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб: «Лемма», 2012, 371 с.
11. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 308 с.
12. Шелутко В.А. Методы обработки и анализа гидрологической информации. - СПбГУ, 2007, 192 с.
13. Brian. P. Neff, J. R. Nicolas. Uncertainty in the Great lakes water balance: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004 - 5100. 2005, 42 с.
14. <http://biodat.ru/doc/lib/klimat.htm>
15. <http://matstats.ru/kt.html>
16. <http://statpsy.ru/t-student/t-test-tablica/>
17. <https://gmvo.skniivh.ru/>
18. <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/findstation>